

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Estudio de las sobretensiones en la desconexión
de transformadores trifásicos en vacío**

AUTOR: Bodas Alonso, Rodrigo

TUTOR: Burgos Díaz, Juan Carlos

Leganés, 20 de junio 2017

“Sin duda alguna esto se lo dedico en especial a mi abuelo Ángel, que sin su inspiración desde pequeño no hubiera llegado a donde estoy, a mi familia, a mi pareja y a mis amigos por todo el apoyo que me han aportado durante esta etapa de mi vida”

Índice

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	5
1.1. Presentación problema	5
1.2. Impacto socioeconómico.....	6
1.3. Marco regulador	6
1.4. Objetivo del trabajo fin de grado.....	11
CAPITULO 2: ATPDRAW	12
2.1. Modelos de transformador	12
2.1.1. Modelo BCTRAN	13
2.1.2. Modelo Híbrido	14
CAPITULO 3: TRANSITORIO DE DESCONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR A LA RED	16
3.1. Introducción.....	16
3.2. Transitorio de desconexión sin considerar las pérdidas	16
3.3. Efecto de las potencias activa.....	19
CAPITULO 4: SELECCIÓN DEL MODELO A UTILIZAR	21
4.1. Introducción.....	21
4.2. Simetría de las corrientes de vacío	21
4.2.1. Corriente de vacío del transformador mediante el modelo XFMR	22
4.3. Influencia de la puesta a tierra del neutro en el transitorio de desconexión del transformador en vacío.....	26
4.3.1. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro PAT usando el modelo XFMR. 27	
4.3.2. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro aislado usando el modelo XFMR. 29	
4.3.3. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro PAT usando el modelo BCTRAN 31	
4.3.4. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro aislado usando el modelo BCTRAN.....	33
4.4. Conclusiones	34

CAPITULO 5: OBTENCION DE LA CORRIENTE DE VACIO	35
4.5. Obtención de la corriente magnetizante a partir de la corriente de vacío del transformador	36
CAPÍTULO 6: TRANSITORIO DE DESCONEXIÓN DE TRANSFORMADORES EN VACIO	43
6.1. Transitorio de desconexión transformador lineal sin pérdidas	43
6.2. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas	53
6.2.1. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas de vacío	53
6.2.2. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas de cortocircuito.....	57
6.2.3. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas de vacío y de cortocircuito.....	60
6.3. Transitorio de desconexión transformador no lineal sin pérdidas	61
6.4. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas	66
6.4.1. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de vacío	67
6.4.2. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de cortocircuito.....	69
6.4.3. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de vacío y de cortocircuito.....	73
6.5. Conclusiones	73
6.5.1. Caso lineal	73
6.5.2. Caso no lineal	75
6.6. Efecto del terciario	76
CAPITULO 7: RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	83
7.1. Resumen del trabajo realizado	83
7.2. Conclusiones	87
7.3. Sugerencias para futuros trabajos	89
8. BIBLIOGRAFIA.....	90
9. ANEXO 1: FIGURAS.....	91
10. ANEXO 2: TABLAS	94

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación problema

En la actualidad es incomprensible que una persona no pueda acceder a un recurso como es la electricidad y las ventajas que esta supone. Por ejemplo poder encender el aire acondicionado en verano, la luz de las bombillas por las noches y una vez entrado en esta mecánica podríamos seguir poniendo ejemplos en los que es necesaria la electricidad en nuestra vida cotidiana.

Para tener suministro de electricidad en nuestra vivienda se deben producir unas acciones, las cuales siguen un orden y vigor, a continuación se muestran dichas acciones:

- Generación
- Transporte
- Distribución

Para que se pueda producir la generación necesitamos generadores asíncronos, los cuales se usan en las centrales, pero no solo necesitamos generadores, también son necesarias líneas de transporte, protecciones, baterías de potencia reactiva y transformadores.

Sin duda alguna, este último es un elemento del sistema eléctrico fundamental desde la generación hasta la distribución. El interruptor automático que conecta y desconecta un transformador ha de ser elegido con cuidado en el caso de que el transformador pueda ser desconectado estando el secundario en vacío (sin carga), ya que por esta causa se pueden producir sobretensiones en el sistema eléctrico.

Las sobretensiones de maniobra, debidas a la actuación de interruptores, se pueden producir por:

- Desconexión de líneas de Alta tensión (AT) que se encuentran en vacío.
- Desconexión de un transformador cuyo secundario está en vacío.
- Despeje de faltas a tierra.

Dado que se pueden dar sobretensiones en cualquier instante de tiempo, es necesario proteger a todos los elementos del sistema eléctrico, para ello los equipos eléctricos deben tener un aislamiento acorde con las sobretensiones que van a tener que soportar en campo. Para estar prevenidos ante sobretensiones se realizan simulaciones que ayudan a determinar el grado de aislamiento necesario en los equipos y las medidas de protección frente a sobretensiones (utilización de pararrayos).

Por tanto, es fundamental conocer las posibles sobretensiones que se den en el sistema eléctrico. Nuestro proyecto tiene como finalidad estudiar las sobretensiones en los transformadores trifásicos generadas por la desconexión de transformadores, para poder dimensionar todas las protecciones y aislamientos para que los transformadores sufran el menor daño posible tras la apertura efectiva del interruptor.

1.2. Impacto socioeconómico

La sociedad actual es una sociedad consumidora de energía eléctrica de forma intensiva. Al ser la energía eléctrica un bien indispensable para el funcionamiento diario de la sociedad, es importante que esta energía se produzca a unos precios asequibles.

Como se ha indicado en el apartado precedente, los equipos en campo sufren sobretensiones a consecuencia de las cuales puede producirse la destrucción del equipo.

El conocer la cuantía de las sobretensiones es importante para elegir un equipo que sea capaz de soportarlas sin que el equipo esté sobredimensionado en exceso. Este estudio también puede servir para tomar la decisión de si se debe conectar un pararrayos o no.

Todo ello tiene un impacto en el precio de la energía eléctrica, ya que un fallo en un equipo acarrea un gasto que podría haberse evitado, y el comprar un equipo sobredimensionado, y por tanto más caro, también tiene una repercusión económica evidente.

1.3. Marco regulador

Como se mencionó en líneas anteriores, todos los equipos del sistema eléctrico deben estar protegidos ante cualquier fenómeno, en el caso a abordar, frente a las sobretensiones.

Sin embargo sería muy costoso diseñar un sistema en el que el riesgo de fallo fuera 0. Por ello frecuentemente se acepta un cierto riesgo de fallo que aunque muy pequeño no es nulo (por ejemplo un fallo cada 5 años). Los equipos más caros deben tener un riesgo de fallo mucho menor que los equipos más baratos. Por eso la norma UNE 60071 (Coordinación de aislamiento) enseña a elegir el aislamiento de los diferentes equipos de forma que en caso de fallo, éste ocurra en los equipos más baratos.

Esta norma indica también los ensayos que se deben realizar para comprobar la aptitud de los equipos para soportar sobretensiones.

La norma 60071 se divide en varias partes las cuales se muestran a continuación:

- Parte 1: Definiciones, principios y reglas
- Parte 2: Guía de aplicación
- Parte 4: Guía computacional para coordinación de aislamiento y modelado de redes eléctricas.
- Parte 5: Procedimientos para estaciones convertidoras en corriente continua.

La norma UNE-60071 -1, recomienda que las tensiones soportadas elegidas deben ser asociadas con la tensión más elevada del material.

Dentro del punto 5 de la norma, el cual hace referencia al procedimiento para la coordinación de aislamiento, nos indica que: “la coordinación de aislamiento radica en la selección del material, junto con el conjunto correspondiente de tensiones soportadas asignadas normalizadas que caracterizan el aislamiento del material para la aplicación” [1]

Las sobretensiones en las redes se clasifican en función de su efecto sobre los equipos eléctricos de la forma indicada en la figura 1-1.

Tipo	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gamas de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de tensión normalizadas	 $f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Ensayo de tensión soportada normalizada	a	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	a

^a A especificar por los comités de producto correspondientes.

Figura 1-1 Tipos de sobretensiones

En los apartados 5.6 y 5.7 de la norma se indica la lista de tensiones soportadas asignadas normalizadas.

En referencia a la relación de tensiones soportadas asignadas normalizadas a frecuencia industrial de corta duración:

Valores eficaces en kV														
10	20	28	38	50	70	95	115	140	185	230	325	360	395	460

Tabla 1-1 Tensiones soportadas normalizadas

Valores eficaces en kV			
510	570	630	680

Tabla 1-2 Tensiones soportadas recomendadas

En referencia a la relación de tensiones soportadas a los impulsos asignadas normalizadas:

Valores de cresta en kV														
20	40	60	75	95	125	145	170	200	250	325	380	450	550	650
750	850	950	1050	1175	1300	1425	1550	1675	1800	1950	2100	2250	2400	

Tabla 1-3 Tensiones soportadas normalizadas

Para la selección del nivel de aislamiento normalizado, recurrimos al punto 5.10 de la norma, el cual indica que las tensiones soportadas asignadas anormalizadas se enlazan con las tensiones más elevadas del material según gama del material.

Los tipos de gama de tensiones más elevadas del material normalizadas son los siguientes:

- **Gama I:** Superiores a 1 kV hasta 245 kV inclusive. En esta gama incluye tanto redes de transporte como redes de distribución. Los distintos aspectos relativos a la explotación debe, por tanto, ser tenidos en cuenta en la selección del nivel de aislamiento asignado del material.
- **Gama II:** Superiores a 245 kV (tabla 3). Esta gama incluye principalmente redes de transporte.

A continuación se muestran las tablas de niveles de aislamientos normalizados de cada gama.

Tensión más elevada del material (U_m) kV (valor eficaz)	Tensión soportada asignada normalizada a frecuencia industrial de corta duración kV (valor eficaz)	Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo kV (valor de cresta)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5 ^a	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52 ^a	95	250
72,5	140	325
100 ^b	(150)	(380)
	185	450
123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170 ^a	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050
NOTA Si los valores entre paréntesis se consideran insuficientes para demostrar el cumplimiento de las tensiones soportadas requeridas entre fases, se necesitan ensayos adicionales de tensión soportada entre fases.		
^a Estos U_m no son valores preferenciales en la Norma IEC 60038 y por lo tanto no se dan estas combinaciones normalizadas muy frecuentemente en las normas de producto.		
^b Estos valores de U_m no se mencionan en la Norma IEC 60038, pero se han incluido en la gama I en ciertas normas de producto.		

Tabla 1-4 Nivel de aislamiento normalizado para la gama I

Tensión más elevada del material (<i>U_m</i>) kV (valor eficaz)	Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo maniobra			Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo ^b kV (valor de cresta)
	Aislamiento longitudinal ^a kV (valor de cresta)	Fase a tierra kV (valor de cresta)	Fase-fase (relación con el valor de cresta fase-tierra)	
300 ^c	750	750	1,50	850
				950
	750	850	1,50	950
				1 050
362	850	850	1,50	950
				1 050
	850	950	1,50	1 050
				1 175
420	850	850	1,60	1 050
				1 175
	950	950	1,50	1 175
				1 300
	950	1 050	1,50	1 300
				1 425
550	950	950	1,70	1 175
				1 300
	950	1 050	1,60	1 300
				1 425
	950 1 050	1 175	1,50	1 425
				1 550
800	1 175	1 300	1,70	1 675
				1 800
	1 175	1 425	1,70	1 800
				1 950
	1 175 1 300	1 550	1,60	1 950
				2 100
NOTA La introducción de <i>U_m</i> por encima de 800 kV está en estudio, y 1 050 kV, 1 100 kV y 1 200 kV se dan como <i>U_m</i> en la Norma IEC 60038 Modificación 2, 1997.				
^a Valores de la componente a impulso del ensayo combinado correspondiente, mientras que el valor de cresta de la componente a frecuencia industrial de polaridad opuesta es $U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$.				
^b Estos valores se aplican de igual forma a aislamiento fase-tierra y fase-fase; para el aislamiento longitudinal se aplica como la componente a impulso tipo rayo asignada normalizada de la tensión soportada asignada normalizada combinada, mientras que el valor de cresta de la componente a frecuencia industrial de polaridad opuesta es $0,7 \times U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$.				
^c Esta <i>U_m</i> no es un valor preferencial en la Norma IEC 60038.				

Tabla 1-5 Nivel de aislamiento normalizado para la gama II

1.4. Objetivo del trabajo fin de grado

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Grado guarda relación con las ideas mencionadas en los apartados precedentes y es el cálculo de las sobretensiones que se producen en transformadores cuando se desconecta el transformador estando el secundario en vacío.

Para llevar a cabo este estudio, realizaremos simulaciones con el programa ATPDraw. El programa ATPDraw dispone de varios modelos de transformador, desde modelos muy elementales que sólo consideran una relación de transformación hasta modelos más sofisticados que incorporan fenómenos más complejos.

Por eso, antes de estudiar la problemática del transitorio de desconexión del transformador se debe elegir el modelo de transformador a utilizar, para ver cual es el mejor modelo para llevar a cabo el estudio de las sobretensiones.

Una vez que se escoja el modelo a usar, se haran varias simulaciones variando determinados parámetros del interruptor (modificación de la corriente arrancada) y del transformador (modificación de los parametros de las pérdidas y comportamiento de linealidad). Ello nos permitirá ver la influencia de la apertura del interruptor y el valor aportado por la modificación de las pérdidas.

Por tanto, el objetivo global se descompondrá en una serie de objetivos secundarios:

- Determinar cuál es el mejor modelo de transformador para el estudio de las sobretensiones de desconexión de transformadores trifásicos.
- Comprender el papel que juegan las diferentes pérdidas de potencia activa del transformador a la hora de reducir la cuantía de las sobretensiones originadas en la apertura de interruptor.
- Entender el efecto que tiene la no linealidad del circuito magnético en la cuantía de las sobretensiones originadas en la desconexión de transformadores en vacío.

CAPITULO 2: ATPDraw

El programa informático que hemos usado para la realización de este Trabajo Fin de Grado, es ATP, Alternative Transients Program, el cual sirve para resolver problemas que se dan en circuitos, mayoritariamente en régimen transitorio. El origen de este programa es el antiguo EMTP, el cual fue desarrollado por Hermann W. Dommel a finales de la década de 1960. A partir de 1984 fue desarrollado por Drs. W.Scott Meyer y Tsu-huei Liu.

Este programa tiene como ventajas que es un estándar y lo usan una gran cantidad de empresas, el mayor inconveniente que el programa posee es que para llevar a cabo las simulaciones de los transitorios usa el método de integración trapezoidal, el cual usa para resolver las ecuaciones diferenciales del sistema que trata de simular.

2.1. Modelos de transformador

ATP nos ofrece la posibilidad de trabajar con diferentes modelos de transformadores, para llevar a cabo el estudio de diferentes transitorios electromagnéticos, según la complejidad del problema a resolver. El programa también da la posibilidad de configurar la constitución de nuestro transformador, entre otros parámetros podemos elegir el tipo y número de columnas del transformador, así como la posibilidad de elegir uno o varios arrollamientos.

Dentro de la selección de transformadores que nos ofrece ATP, podemos elegir varios modelos de transformadores los cuales se muestran a continuación:

- Transformador Ideal
 - Monofásico.
 - Trifásico.
- Modelo Saturable.
 - Monofásico.
 - Trifásico.
- Modelo BCTRAN.
- Modelo XFMR

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado solo usaremos un modelo de transformador, la elección del modelo más adecuado se realizará en el capítulo 4 de esta memoria.

A continuación se muestra una breve descripción de los diferentes modelos que incorpora ATPDraw, como se observa son modelos más complejos que los iniciales (Transformador Ideal y Transformador Saturable) esto es así porque la realización de este estudio requiere que los resultados para los casos planteados sean más acordes a la realidad.

2.1.1. Modelo BCTRAN

Es el primer modelo de transformador acorde a nuestras necesidades para la resolución de nuestra problemática. Este modelo surge para completar las carencias que tiene el modelo saturable cuando se usa en estudios de transformadores trifásicos.

Este tipo de modelo tiene la peculiaridad de realizar una representación lineal del núcleo en forma de matrices de impedancias o admitancias en derivación, teniendo en cuenta los acoplamientos entre devanados y las pérdidas de histéresis. Pero tiene la problemática que para realizar estudios, en el que el comportamiento del transformador no es lineal, puede dar error debido a que la saturación del transformador no se completa correctamente.

En relación al comportamiento no lineal del transformador, se puede conseguir este fenómeno incluyendo en el circuito a simular inductancias variables lo más próximas al núcleo magnético.

Como se comentó anteriormente dentro de este modelo podemos elegir dos o tres arrollamientos. Admite diferentes tipos de núcleos como pueden ser: transformadores monofásicos, transformadores de tres columnas, transformadores de cinco columnas o incluso transformadores acorazados.

Un inconveniente de este transformador es que no tiene en cuenta las capacidades parásitas que los transformadores poseen.

En la figura 2-1 se muestra el circuito equivalente de este modelo de transformador.

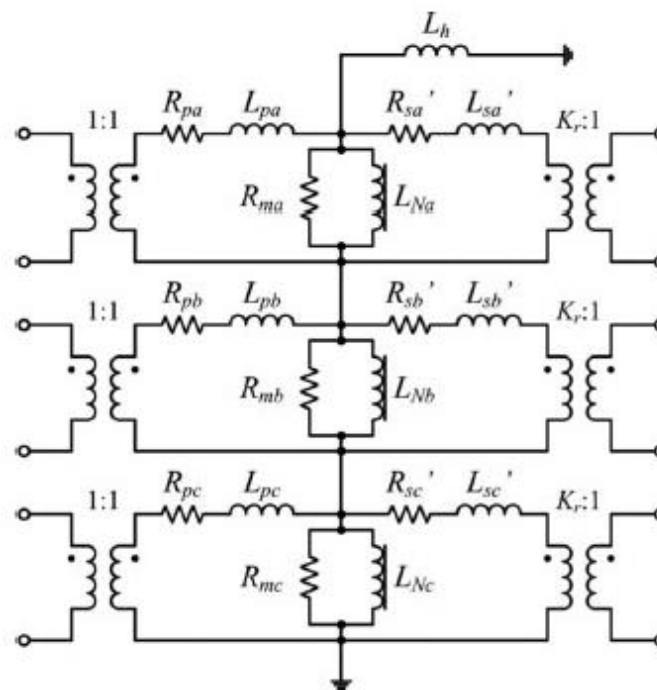


Figura 2-1 Circuito equivalente eléctrico del transformador trifásico de tres columnas.

2.1.2. Modelo Híbrido

El modelo de transformador híbrido o también conocido como modelo XFMR es un transformador peculiar puesto que aparte de las ventajas que da un transformador normal incluye las siguientes:

- Minimiza las pérdidas
- Minimiza el efecto de los armónicos.

Este modelo fue añadido al programa ATPDraw en la versión 4.2 en el verano de 2005. El modelo surgió para mejorar el modelo citado anteriormente, el cual hace referencia al modelo BCTRAN. Al igual que el modelo anterior, este tipo de transformador tiene la opción de elegir el número de devanados, ya sean dos o tres, y también dentro de los ajustes tenemos la posibilidad de elegir tipo de núcleo. A continuación se muestran las opciones de núcleo que nos da este modelo.

Tipos de núcleo magnético del modelo XFMR:

- Bancos de transformadores monofásicos
- Transformadores de tres columnas
- Transformadores de cinco columnas
- Dos tipos de núcleos para transformadores acorazados

A parte de lo mencionado anteriormente este modelo posee otras mejoras, las cuales se muestran en los siguientes puntos.

- Tiene en cuenta las resistencias de los devanados y hace que estas dependan de la frecuencia a la que trabajamos, para tener en cuenta el efecto pelicular (efecto piel).
- Realiza una correcta representación de la no linealidad del núcleo. Para tener en cuenta la no linealidad del núcleo habitualmente se recurre a la curva de Frolich:

$$B = \frac{H}{a + b \cdot H}$$

Donde a y b son constantes. Sin embargo Mork y Martínez vieron que en los materiales modernos la ecuación anterior arroja resultados no muy satisfactorios, y propusieron la siguiente ecuación alternativa para modelar la no linealidad del núcleo magnético:

$$B = \frac{H}{a + b \cdot H + c \cdot \sqrt{H}} + \mu_0 \cdot H$$

- Los autores mencionados también comprobaron que las ecuaciones clásicas utilizadas para el cálculo de las pérdidas en el hierro al variar la tensión o la frecuencia aplicadas al transformador no arrojan resultados muy próximos a la realidad, por lo que propusieron una expresión que se ajusta mejor a la dependencia de las pérdidas en el hierro con la frecuencia y la inducción. La expresión propuesta es:

$$p_{Fe} = \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} (d \cdot B^2 + e \cdot B^{10})$$

- Nos da la opción de introducir los valores de las capacidades entre arrollamientos y entre arrollamientos y tierra. Opción que el modelo BCTRAN no facilita.
- El modelo XFMR introduce acoplamientos capacitivos entre los arrollamientos de Alta Tensión (AT) de las diferentes fases del transformador.

Otro detalle de este modelo, es que se pueden incluir inductancias, capacidades o resistencias con datos geométricos tales como el diametro del núcleo, anchura de los arrollamientos, etc...

Este tipo de transformador utiliza un modelo basado en dualidad que hay en los circuitos eléctrico y magnéticos, dando lugar a que el circuito magnético sea representado como un circuito eléctrico.

Seguidamente en la figura 2-2 se puede observar el circuito equivalente del modelo híbrido. Donde en diferentes colores se evidencian las partes del transformador:

- En color verde hace referencia al circuito eléctrico dual del circuito magnético.
- En color azul se indican las inductancias de dispersión
- En color naranja se presentan las resistencias de los arrollamientos, dependientes de la frecuencia.
- Por último, en color rojo se muestran las capacidades parásitas entre arrollamientos, entre arrollamientos y tierra y entre el lado de Alta Tensión y el lado de Baja Tensión.

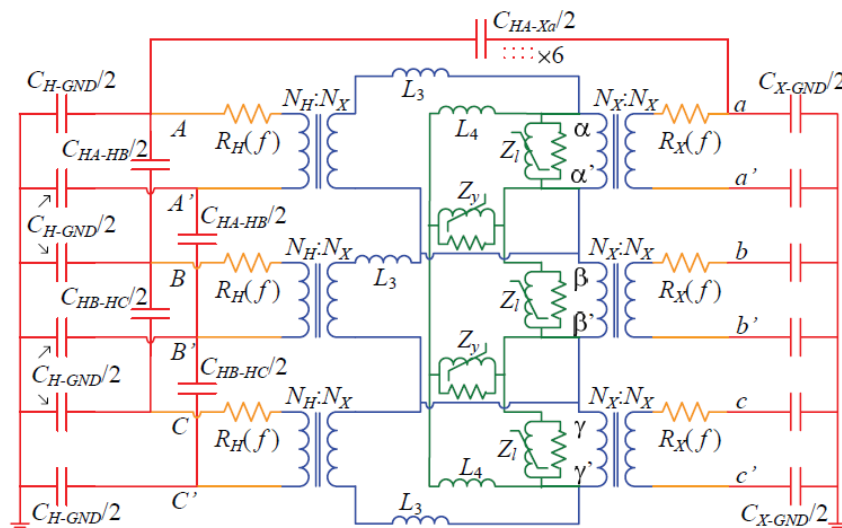


Figura 2-2 Circuito equivalente del transformador XFMR

CAPITULO 3: TRANSITORIO DE DESCONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR A LA RED

3.1. Introducción

Este tercer capítulo tiene como finalidad justificar las razones por las que se crean sobretensiones transitorias en la desconexión del un transformador en vacío.

Entendemos por transitorio, un estado que tiene una duración limitada. Por tanto el transitorio de desconexión, será el periodo limitado a los primeros ciclos tras la desconexión de la red.

En en primer momento se considerará un transformador ideal sin pérdidas y posteriormente se comentará el efecto de dichas pérdidas de potencia activa.

3.2. Transitorio de desconexión sin considerar las pérdidas

En un circuito inductivo la tensión es la derivada de la corriente multiplicado por el coeficiente de autoinducción:

$$u = L \frac{di}{dt}$$

De la ecuación anterior se desprende que la corriente en una bobina ha de ser una función continua en el tiempo. Por esta razón, cuando se da la orden de apertura del interruptor que alimenta un equipo con carácter inductivo, los electrodos del interruptor comienzan a separarse pero no por ello se extingue la corriente, sino que la corriente se perpetúa en forma de arco eléctrico. En el paso por cero de la corriente, el plasma que forma el arco eléctrico se enfría y el arco se extingue. Por tanto se debe diferenciar el instante de tiempo en el cual se da la orden de apertura del interruptor del instante de tiempo en el cual se produce la apertura efectiva del circuito (la corriente se extingue sin que se vuelva a reencender el arco).

El interruptor automático que maniobra un transformador ha de ser elegido en función de la corriente nominal del transformador y en función de la intensidad de cortocircuito del mismo.

En los modernos transformadores de potencia las corrientes de vacío son muy reducidas (inferiores al 0,5% de la corriente nominal del transformador). Los modernos interruptores automáticos de vacío y de hexafluoruro de azufre tienen una capacidad de corte muy elevada. Además (especialmente en los interruptores de vacío), para bajas intensidades de corriente el arco eléctrico tienen una temperatura reducida y esto hace que sea un arco inestable, que puede sufrir apagados y reencendidos. Los dos hechos citados en este párrafo hacen que en un transformador en vacío el interruptor pueda abrir el circuito antes del paso natural de la corriente por cero.

Sin embargo, como se indicó anteriormente la corriente en una bobina no puede ser una variable discontinua en el tiempo.

Para poder compatibilizar el hecho de que el interruptor automático corte la corriente antes de su paso natural por cero y el hecho de que en una bobina la corriente debe ser una función continua al transcurrir el tiempo es imprescindible tener en cuenta las pequeñas capacidades parásitas existentes entre los arrollamientos del transformador y entre éstos y los elementos puestos a tierra (cuba, núcleo magnético).

A continuación mostramos imagen del circuito equivalente de un transformador:

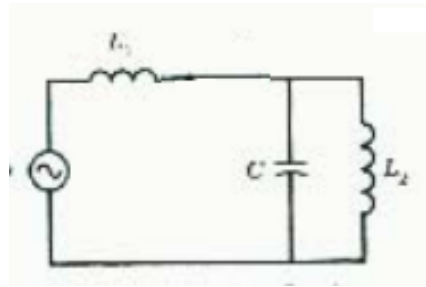


Figura 3-1 Circuito equivalente del transformador.

En la imagen Figura 3-1 se ven una C , la cual hace referencia a las capacidades parásitas, las cuales existentes entre los arrollamientos y tierra. En la desconexión del transformador estas capacidades parásitas quedan cargadas a un valor de tensión, y darán un proceso oscilatorio de carga y descarga con las inductancias magnetizantes del transformador.

Si la desconexión se produce por el paso por cero de la corriente, sucede que la capacidad queda cargada con un valor máximo próximo a la máxima tensión de alimentación.

En la figura 3-2 podemos ver lo anteriormente comentado, cuando la corriente en la bobina se extingue en su paso por cero aparece en bornas del interruptor la tensión transitoria de restablecimiento.

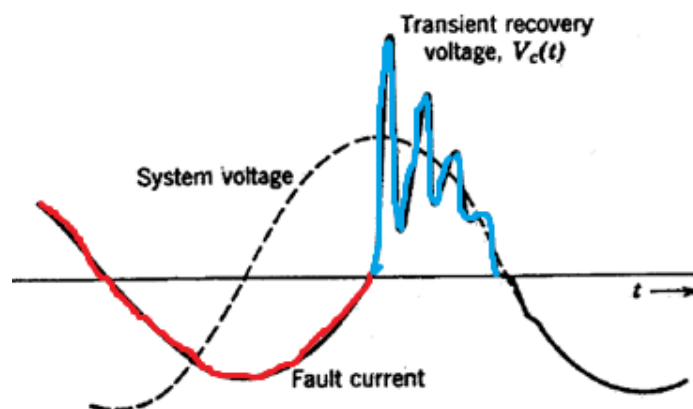


Figura 3-2 Tensión Transitoria de Restablecimiento

El proceso transitorio supone un intercambio energético entre la energía almacenada en el núcleo magnético del transformador y la energía electrostática almacenada en las capacidades parásitas del mismo. Dicho intercambio energético se produce en forma de oscilaciones, que obviando las pérdidas de potencia activa del transformador, son oscilaciones no amortiguadas. El proceso oscilante se comportará como un péndulo dentro del circuito, en el cual la energía cinética se convierte en potencial y viceversa, aquí la energía magnética se convierte en energía electrostática y viceversa.

El proceso oscilatorio tendrá por frecuencia el valor obtenido de aplicar la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot C}}$$

Donde L_m es el valor de la inductancia magnetizante y C es la capacidad parásita a tierra del transformador. Esta frecuencia tiene un valor mucho más elevado que la frecuencia del sistema.

La energía almacenada en las capacidades parásitas depende de la tensión en bornes del transformador, mientras que la energía almacenada en el campo magnético depende de la corriente magnetizante. Por tanto, el valor máximo de la tensión en bornes del transformador se producirá cuando toda la energía almacenada lo sea en las capacidades parásitas, esto es, cuando no se tenga energía magnética alguna almacenada en el núcleo magnético. Realizando un balance de energía se obtiene la tensión máxima:

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{max}^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{mag}^2 + \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{desconexión}^2$$

En la figura 3-3 se muestra lo anteriormente comentado.

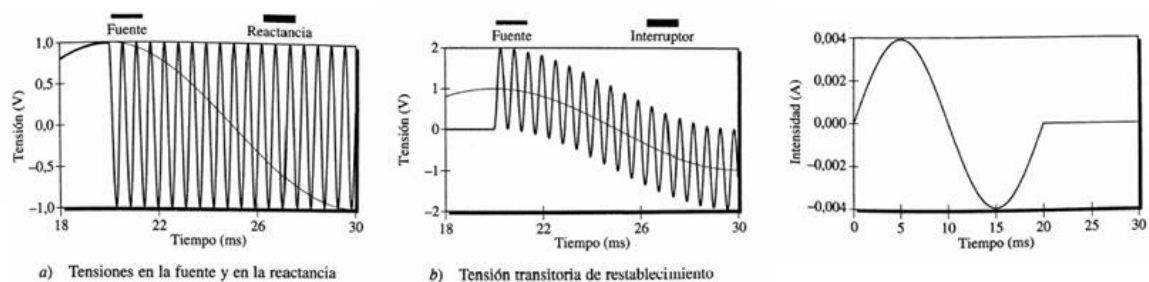


Figura 3-3 Representación de tensiones y corrientes durante el corte de una pequeña corriente inductiva en el paso por cero

En el caso en que la apertura no se produzca por el paso por cero de la corriente y se produzca en un valor de corriente arrancada del interruptor (I_{mar}), el valor de la tensión transitoria de restablecimiento será muy superior al valor máximo de tensión nominal del circuito, para este caso las oscilaciones seguirán siendo no amortiguadas y la frecuencia natural seguirá siendo la misma.

Para este caso también podemos obtener los valores de tensión máximos aplicando el balance de energía de la ecuación 2. Para obtener el valor máximo de tensión solamente tendremos que despejar de la ecuación anterior, el término U_{max} , lo cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$U_{max} = \sqrt{\frac{L}{C} \cdot I_{mag}^2 + U_{desconexión}^2}$$

En la figura 3-4 podemos ver un ejemplo de lo citado anteriormente.

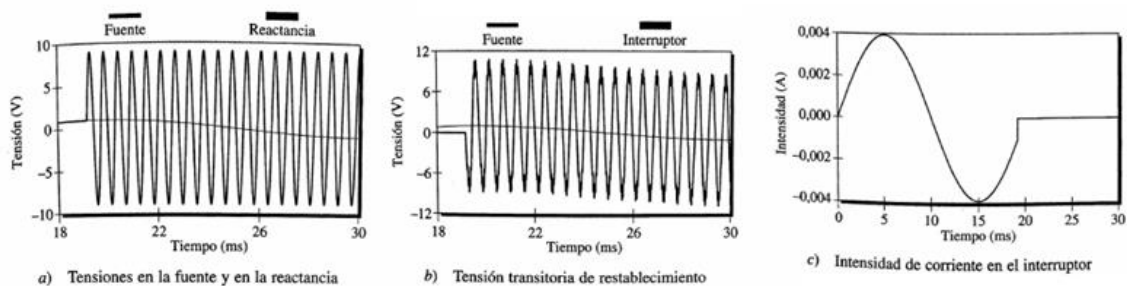


Figura 3-4 Representación de tensiones y corriente durante el corte de una pequeña corriente inductiva antes del paso por cero

3.3. Efecto de las potencias activa

En este apartado, se muestra lo que sucede cuando se tienen en cuenta el valor de las pérdidas.

A lo citado anteriormente, volveríamos a tener dos casos de estudio:

- 1º Caso: En el cual se produce cuando la apertura del interruptor se produce por un paso por cero.
- 2º Caso: En el cual se produce cuando la apertura del interruptor no se produce por un paso por cero, si no por un valor de corriente arrancada del interruptor (I_{mar}).

A continuación mostramos una figura del circuito equivalente del transformador.

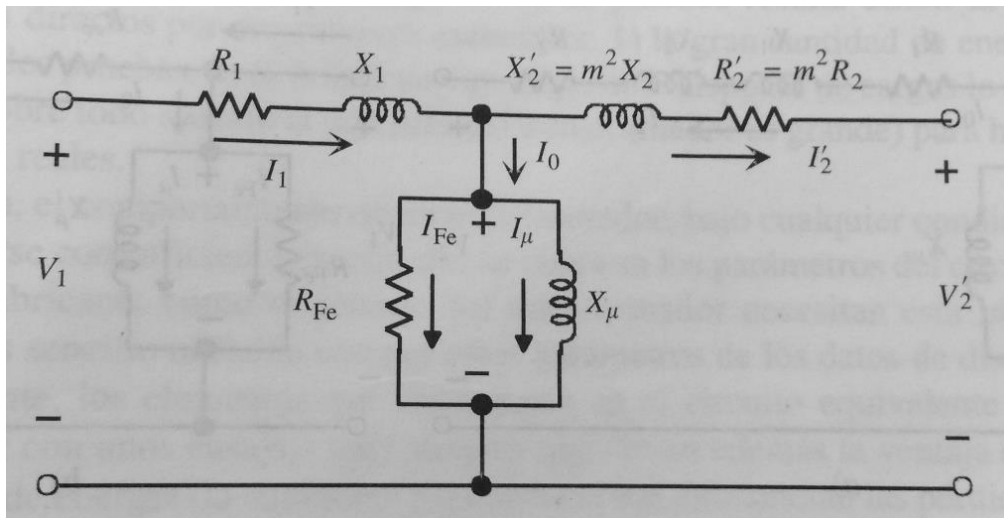


Figura 3-5 Circuito equivalente exacto de un transformador real reducido al primario.

La diferencia de la figura 3-5 con la figura 3-1, es que en este caso al considerar las pérdidas en el circuito ponemos la resistencia del transformador. Ciertamente que no se muestran las capacidades parásitas.

En estos casos se vuelve a producir un fenómeno oscilatorio, en el cual la capacidad se queda cargada en un valor de tensión máximo y la rama vacío se queda descargada. El fenómeno oscilatorio tendrá por valor de la frecuencia el obtenido en la ecuación mostrada a inicio del apartado 3.1, al introducir los valores de inductancia magnetizante y las capacidades parásitas del transformador usado en las simulaciones.

Este fenómeno, vuelve a recrear el movimiento del péndulo en el cual, como ya se citó anteriormente la energía cinética se convertirá en potencial y viceversa. La máxima tensión en bornas del transformador se dará en aquel instante del ciclo en el que toda la energía esté almacenada en forma electrostática. La diferencia con los casos anteriores es que las ondas de tensión tras la apertura del interruptor se irán amortiguando debido a las pérdidas, que se hacen presentes por medio de la resistencia.

Como conclusión, las pérdidas de transformador representan un gran coeficiente de amortiguación que reduce significativamente el valor máximo teórico.

CAPITULO 4: SELECCIÓN DEL MODELO A UTILIZAR

4.1. Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo seleccionar el modelo de transformador más adecuado para simular el transitorio de desconexión en vacío. Inicialmente el modelo XFORMER se presenta como superior al modelo BCTRAN, tal y como se indicó en el apartado 2.1.2, pero para tomar la decisión definitiva someteremos ambos transformadores a dos pequeñas pruebas que se detallan en los apartados siguientes.

4.2. Simetría de las corrientes de vacío

En un transformador trifásico de tres columnas las corrientes de vacío son desequilibradas, ya que las corrientes de las dos fases laterales son aproximadamente iguales (en realidad la existencia de pequeñas diferencias en los entrehierros entre las chapas tiene bastante influencia), mientras que la corriente de vacío de la fase central es bastante menor que la de las fases laterales.

Sin embargo, en el caso de que el transformador esté formado por tres unidades monofásicas las corrientes de vacío de las tres fases tienen un valor aproximadamente idéntico.

Dada la importancia que tiene el valor de la corriente de vacío en el estudio que se lleva a cabo en este Trabajo Fin de Grado se han hecho unos estudios preliminares para verificar el equilibrio de las corrientes de vacío. Las características del transformador utilizado se pueden ver en la tabla 4-1.

Parámetros	Valor
Potencia Primario [MVA]	150 [MVA]
Tensión Primario [kV]	230 [kV]
Potencia Secundario [MVA]	150 [MVA]
Tensión Secundario [kV]	71 [kV]
Conexiones	Yy
Tipo de Núcleo	Triplex
Tiempo de simulación [s]	0.060 [s]

Tabla 4-1 Parámetros del transformador estudiado.

Como se aprecia en dicha tabla, las simulaciones se realizan suponiendo que se trata de un banco de transformadores compuesto por tres unidades monofásicas (núcleo Triplex).

En la figura 4-1, se muestra una imagen de un banco de transformadores trifásico:

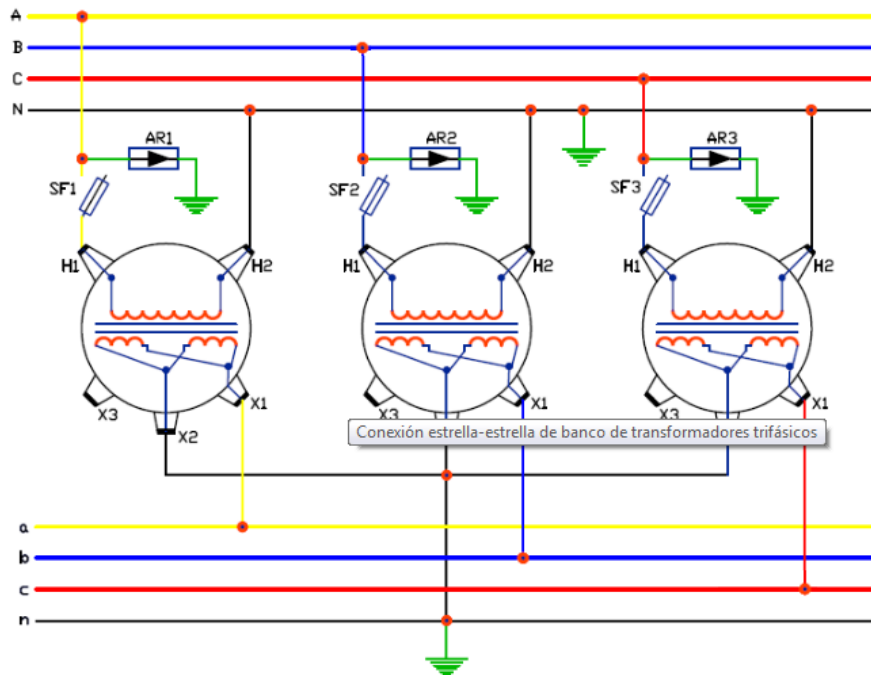


Figura 4-1 Banco de transformadores trifásico

4.2.1. Corriente de vacío del transformador mediante el modelo XFMR

Para definir la corriente de vacío en la pestaña “Core” del modelo de transformador no se seleccionó la casilla “Average currents”, ello permite introducir la corriente de vacío en cada una de las fases por separado en lugar de proporcionar un valor medio de la corriente de vacío de las tres fases. Para realizar la simulación se introdujo un valor de corriente idéntico en las tres fases. Sólo se introdujo el valor de la corriente correspondiente a una tensión 1 p.u., lo cual supone admitir una curva de magnetización lineal y se redujeron las pérdidas en el hierro a un valor prácticamente despreciable, en posteriores apartados se analizara la influencia de este parámetro. Todo esto se muestra en la figura 4-2.

Hybrid transformer :

Structure

Number of phases: 3

Number of windings: 2

Type of core: Triplex

Test frequency [Hz]: 50

Data based on: Ind. Res. Cap. Core

Design param. Test report Typical values

Ratings & connections

	Prim.	Sec.
L-L voltage [kV]	230	71
Power [MVA]	150	150
Connections	Y	Y
Phase shifts	0	0
Node names	X0004	X0002

Winding sequence: core-inner-outer S P

☒ Ext. neutral connections

☒ Hide core nodes

Data

Inductance Resistance Capacitance Core

Performed at: Prim

☐ Average currents

☐ Zero seq. available

Insert Delete

Relative dimensions

positive sequence @150 [MVA]

Volt [%]	Loss [kW]	IA [%]	IB [%]	IC [%]
100	0.01	0.059	0.059	0.059

☐ Initialize

View fl/i

View core

Settings...

Order: 0 Label: Comment: Hide

OK Cancel Import Export Edit defin. Help

Figura 4-2 Ajuste de corriente de vacío del transformador

Como se observa en la figura 4-3 los resultados obtenidos no son los esperados, pues las corrientes en las tres fases no son idénticas.

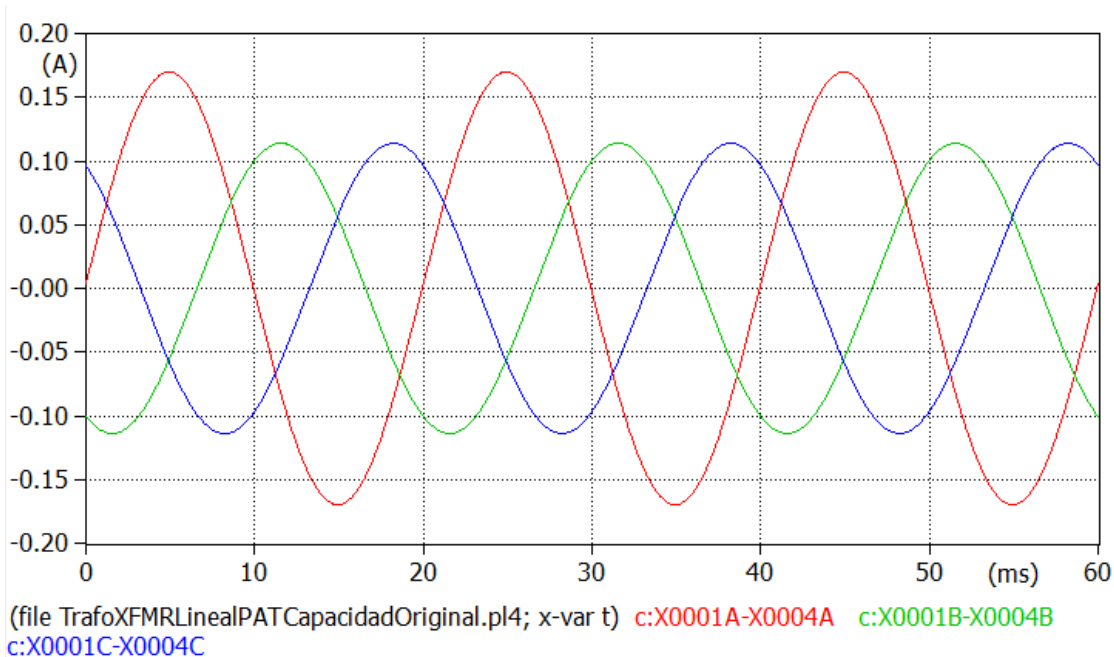


Figura 4-3 Corriente de vacío del transformador con el neutro PAT. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C

A la vista de este resultado se modificaron los parámetros del modelo para ver si era posible conseguir unas corrientes simétricas. Como fruto de este estudio se comprobó que el motivo del desequilibrio de corrientes entre las tres fases no es otro que las capacidades entre arrollamientos del transformador. Las cuales las mostramos en la siguiente tabla.

Capacidades originales	Valor tercio [nF]
P-G	1,5253
S-G	4,296666667
P-S	2,2643

Tabla 4-2 Valores de las capacidades.

Como se observa en la figura 4-4, se pudo comprobar que las corrientes son simétricas cuando las capacidades entre arrollamientos son cero.

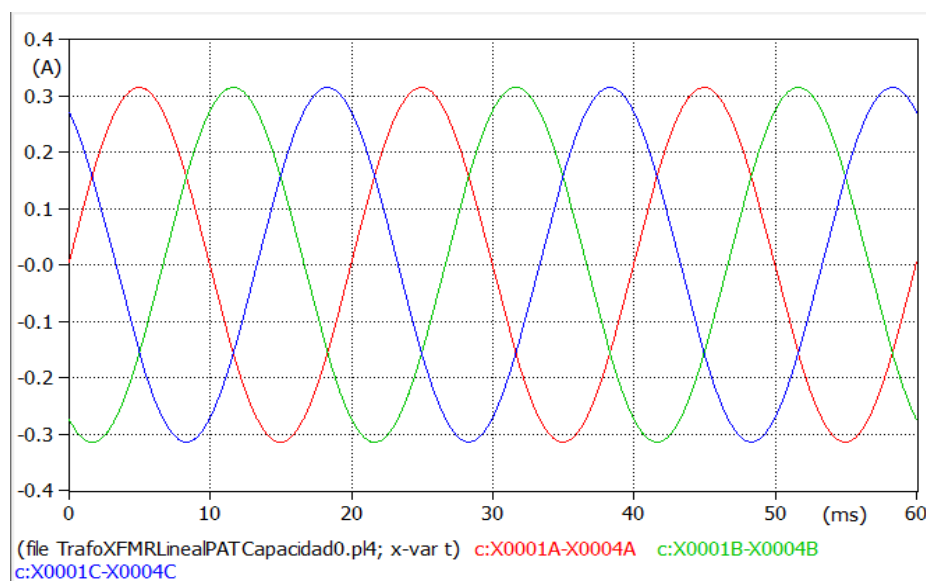


Figura 4-4 Corriente de vacío del transformador con el neutro PAT. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C.

Este comportamiento no es el esperado, ya que aunque existan capacidades parásitas estas están conectadas entre arrollamientos y entre arrollamientos y tierra (fig 4.5) y son iguales en las tres fases, de modo que la existencia de capacidades no debería provocar un sistema de corrientes desequilibrado.

Este comportamiento hubiera sido el esperado si hubieran incluido capacidades entre fases, pero en el caso que nos ocupa hemos indicado que el valor de las capacidades entre fases es nulo.

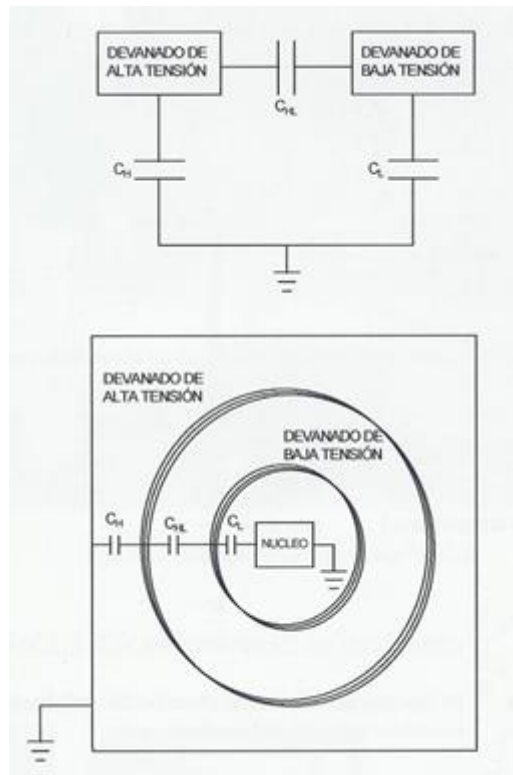


Figura 4-5 Circuito dieléctrico de un transformador de dos arrollamientos

El hecho de que las capacidades entre arrollamientos de la misma fase altere la simetría de corrientes supone un serio problema a la hora de utilizar este modelo en un Trabajo Fin de Grado, ya que el valor de la corriente de vacío es fundamental en el valor de las sobretensiones que se tienen al desconectar un transformador en vacío.

Para comprobar si el modelo pudiera ser utilizable cambiando alguna capacidad menos significativa se hizo un pequeño análisis para comprobar cuál o cuáles de las capacidades tenía mayor influencia en las corrientes.

Para ello se variaron las capacidades entre arrollamientos, comparando el caso base con casos en los la capacidad se reduce a una quinta parte de su valor original.

En la tabla 4-3 se muestra la corriente en las tres fases al variar las capacidades:

	CAPACIDAD P-G [nF]	CAPACIDAD P-S [nF]	CAPACIDAD S-G [nF]	I _{max} A [A]	I _{max} B [A]	I _{max} C [A]
Caso inicial	1,5253	2,2643	4,30	0.17	0.11	0.11
1º Caso	0,3051	2,2643	4,30	0.22	0.19	0.19
2º Caso	1,5253	0,4529	4,30	0.23	0.2	0.2
3º Caso	1,5253	2,2643	0,859	0.18	0.12	0.12

Tabla 4-3 Resultado de las corrientes con las capacidades modificadas

En cuanto a las modificaciones que han sido realizadas en las capacidades en los cuatro casos de estudio observamos lo siguiente.

Al variar la capacidad a la quinta parte las corrientes en las fases cambian de los valores datos iniciales a valores superiores, lo cual es lógico, ya que la corriente capacitiva demandada por las capacidades parásitas compensa la corriente inductiva precisa para magnetizar el transformador. El cambio más significativo se produce en el primer y segundo caso, en el cual los valores de las corrientes en las fases B y C aumentan en casi un amperio.

Finalmente la conclusión que sacamos de este apartado, es que las capacidades más influyentes son las de primario-tierra y primario-secundario. Esto supone un problema importante a la hora de utilizar el modelo XFMR, puesto que en el estudio de las sobretensiones la capacidad primario tierra tiene una gran importancia.

Puesto que con la reducción de valor de las capacidades no obtenemos la simetría en las ondas, las pequeñas pruebas que haremos con los transformadores, las haremos sin tener en cuenta el valor de las capacidades, es decir, en los siguientes estudios las capacidades tendrán un valor nulo.

4.3. Influencia de la puesta a tierra del neutro en el transitorio de desconexión del transformador en vacío

Uno de los objetivos del Trabajo Fin de Grado es analizar la influencia que tiene la puesta a tierra del neutro de Alta Tensión (AT) en el valor de las sobretensiones de desconexión de transformadores en vacío. Por ello se analizó el comportamiento de los modelos de transformador XFMR y BCTRAN en dos casos concretos:

- Apertura con el neutro aislado.
- Apertura con el neutro puesto a tierra.

En ambos casos la apertura efectiva del interruptor se realiza en el paso por cero de la corriente.

Para realizar este estudio tomaremos el valor nulo de las capacidades puesto que si no lo hiciéramos las corrientes saldrían asimétricas como hemos visto en el apartado anterior.

4.3.1. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro PAT usando el modelo XFMR.

El circuito utilizado en el estudio puede verse en la figura 4-6.

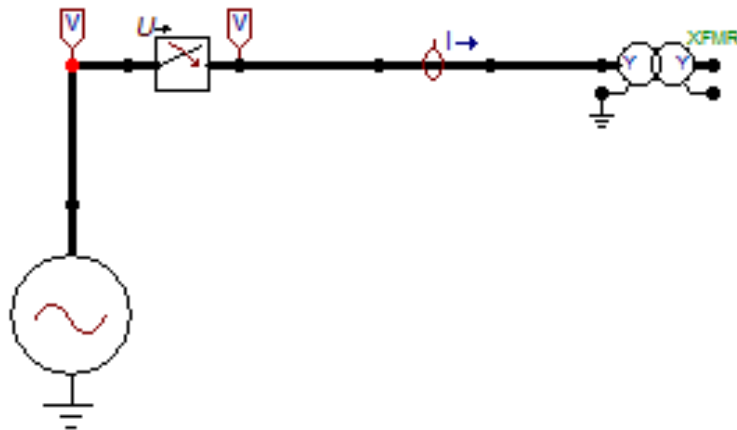


Figura 4-6 Circuito apertura interruptor XFMR con PAT

Los resultados de la simulación se muestran en la figura 4-7. Como se puede observar la corriente sigue el comportamiento teórico esperado: cada una de las corrientes se extingue en su paso por cero, de modo que median 60 ° eléctricos entre la apertura efectiva de cada fase del circuito. Esto es posible porque al existir neutro, la tensión de fase-neutro de la red queda aplicada a cada fase del transformador, haciendo así independiente el funcionamiento de una fase del funcionamiento de las demás. Por el neutro retorna a tierra la suma de las corrientes de fase. Así, cuando se han extinguido las corrientes de las fases A y B (rojo y verde en la figura) la corriente puede seguir circulando sólo por una fase (fase C, color azul) puesto que dispone de un camino para retornar.

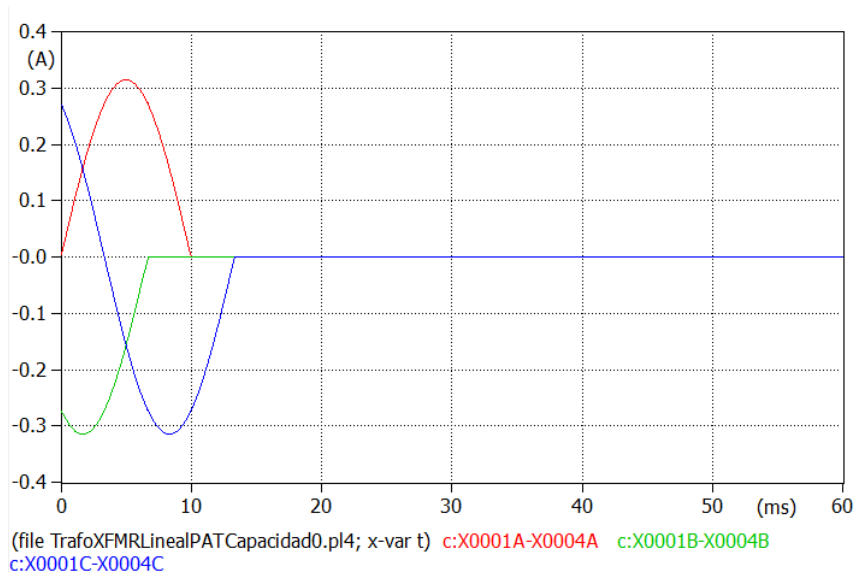


Figura 4-7 Corriente de vacío del transformador XFMR con PAT. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C

Para este mismo transitorio se ha obtenido la TTR tras abrir el interruptor en el instante de $t=5$ ms. Como observamos en la figura 4-8 el comportamiento de la TTR es el esperado puesto que al estar el neutro puesto a tierra las tensiones entre el polo del interruptor de la fase que abrió y el polo unido al transformador es igual a la tensión fase-neutro, pues al ser un núcleo triplex (banco de transformación compuesto por tres unidades monofásicas) y no circular corriente por una fase, la tensión en bornas de dicha fase es cero.

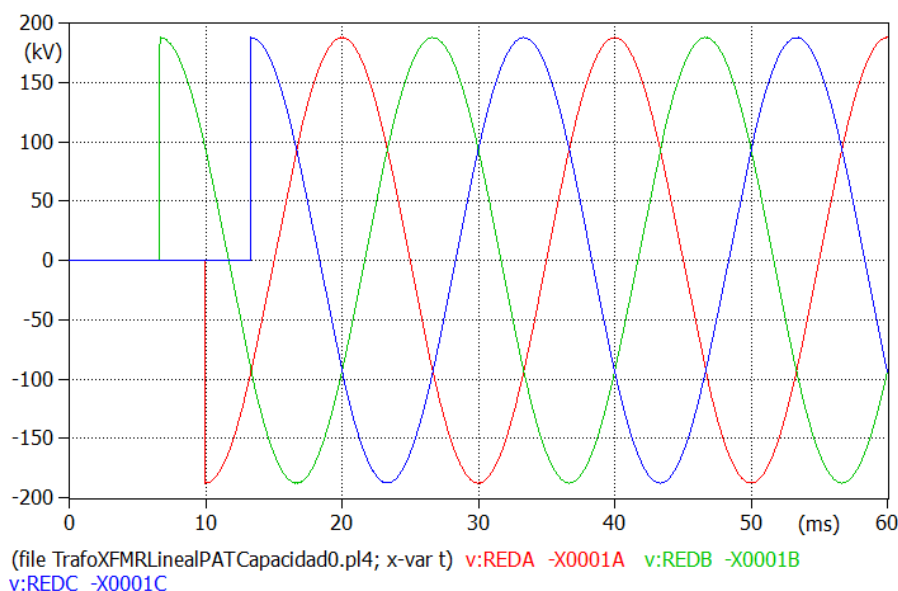


Figura 4-8 Tensión Transitoria de Restablecimiento del transformador XFMR con PAT. Caso lineal. Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.

4.3.2. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro aislado usando el modelo XFMR.

La segunda simulación que se ha realizado es la apertura del interruptor en un transformador con neutro aislado utilizando el modelo XFMR. En la figura 4-9 se muestra el circuito utilizado.

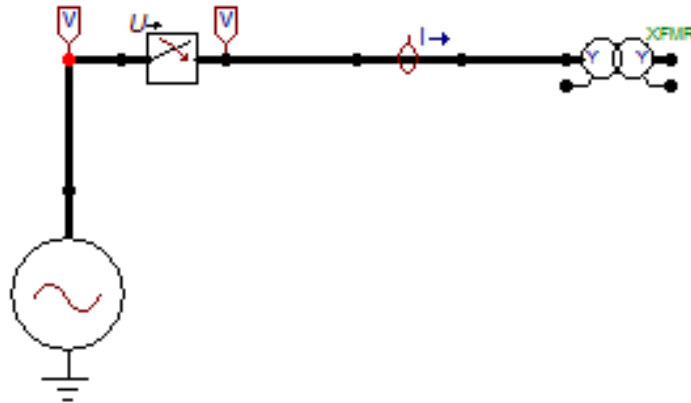


Figura 4-9 Circuito apertura interruptor XFMR con neutro aislado

La corriente de vacío obtenida en la simulación se muestra en la figura 4-10. Como se observa la corriente de vacío no sigue el comportamiento teórico esperado, puesto que al estar el neutro aislado la corriente por las fases A y C deberían ser idénticas y de signo opuesto a partir del momento en el que se extingue la corriente en la fase B, ya que en este caso la corriente no puede retornar a la fuente por el neutro (recuérdese que, además, las capacidades a tierra son nulas en este caso) y no lo es. Por tanto el comportamiento del XFMR tras apertura del interruptor no es adecuado.

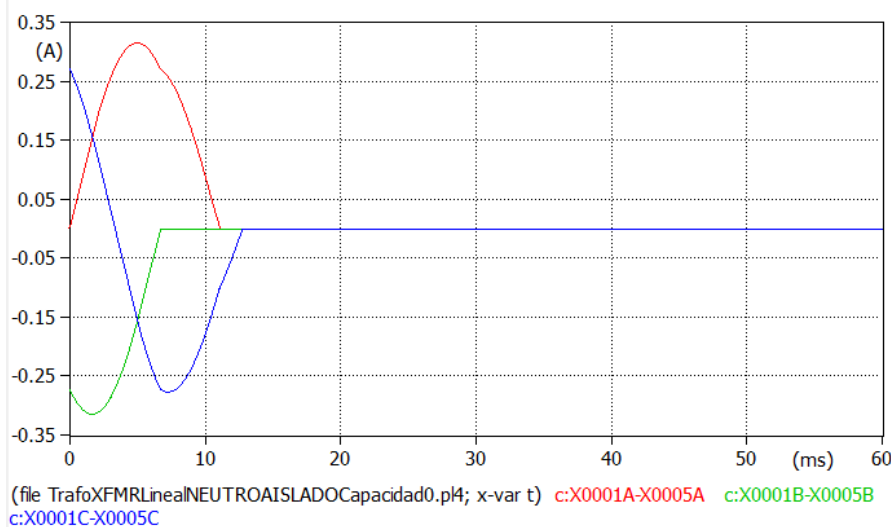


Figura 4-10 Corriente de vacío del transformador XFMR con Neutro Aislado. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C

Por otro lado como hicimos en el caso anterior, también hemos procedido a la obtención de la TTR y como vemos en la figura 4-11 no sigue un comportamiento correcto. Puesto que al ser un sistema con neutro aislado, cuando se extingue la corriente por la fase B el neutro del transformador queda a un potencial que es la semisuma de la tensión de línea U_{CA} , con lo que la tensión transitoria de restablecimiento debería ser mayor que la que se tienen en las otras dos fases cuando abran (esto es lo que en la literatura técnica se suele llamar “factor del primer polo”) y vemos que no es así. Por tanto para este caso, el comportamiento del modelo XFMR no es el adecuado.

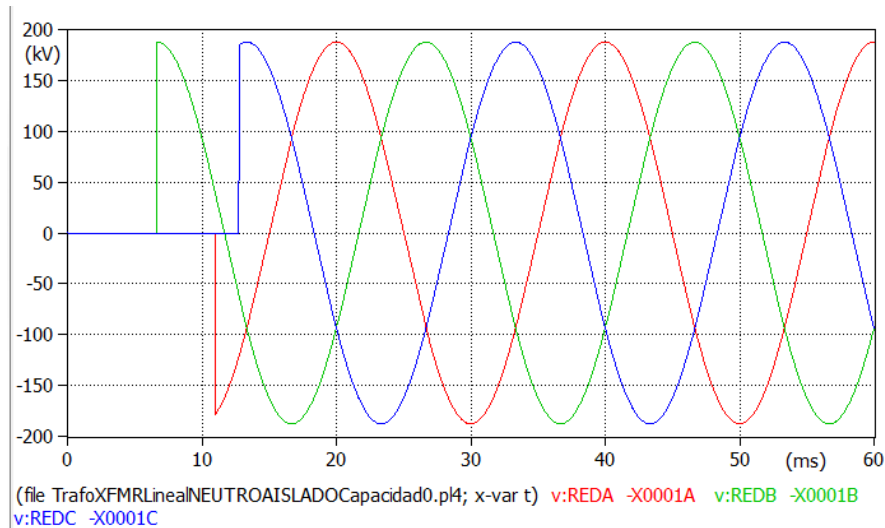


Figura 4-11 Tensión Transitoria de Restablecimiento del transformador XFMR con el neutro aislado. Caso lineal. Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.

Hacemos un énfasis en el factor de primer polo, de forma más visual se puede observar en la figura 4-12. En la cual observamos un circuito trifásico simple. En dicho caso la tensión a es mayor que el resto por el efecto nombrado anteriormente. En el caso que nos importa no se observa el factor de primer polo puesto que la tensión B no es 1,5 veces superior al resto por eso el mal comportamiento del transformador para este caso.

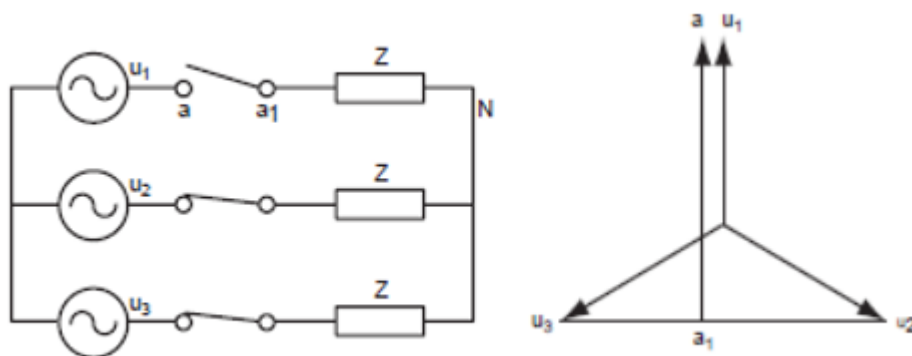


Figura 4-12 Sistema con neutro aislado y diagrama fasorial de dicho circuito.

4.3.3. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro PAT usando el modelo BCTRAN

El circuito utilizado en el estudio puede verse en la figura 4-13.

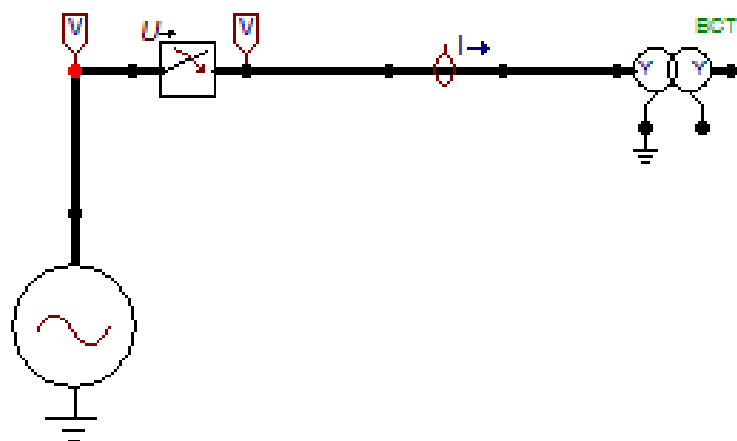


Figura 4-13 Circuito apertura interruptor BCTRAN con PAT

La primera simulación que se realizó con este modelo de transformador es el transitorio de desconexión del transformador en vacío. La evolución de la corriente se muestra en la figura 4-14. Como se observa la corriente sigue el comportamiento teórico esperado, puesto que al estar el neutro puesto a tierra las corrientes poseen un camino de retorno y estas pueden extinguirse en diferentes instantes de tiempo.

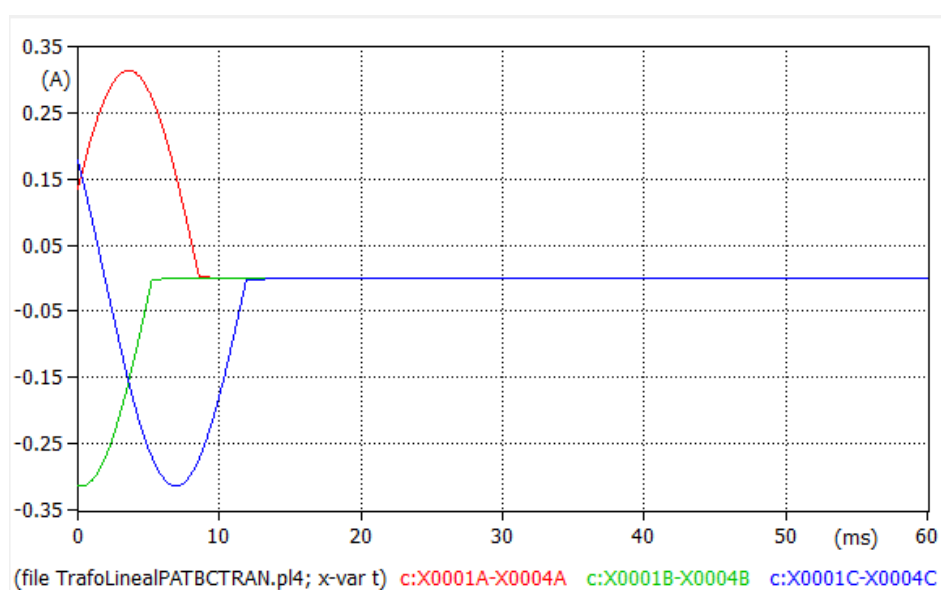


Figura 4-14 Corriente de vacío del transformador BCTRAN con Neutro Puesto a Tierra. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C

Por otro lado también hemos procedido a la obtención de la TTR y como vemos en la figura 4-15 sigue un comportamiento correcto. Puesto que en cuanto se abre el interruptor de una de las fases la tensión en bornas de esa unidad monofásica cae a cero y la TTR coincide con la tensión fase neutro de la red. Al haber supuesto las pérdidas despreciables el instante de paso por cero de la corriente coincide con el paso por máximo de la tensión fase-neutro respectiva. El motivo de que el valor de cresta del primer semiciclo de la TTR sea inferior al de los semiciclos siguientes se justificará en el capítulo 6. Por tanto para este caso, el comportamiento del modelo BCTRAN es el adecuado.

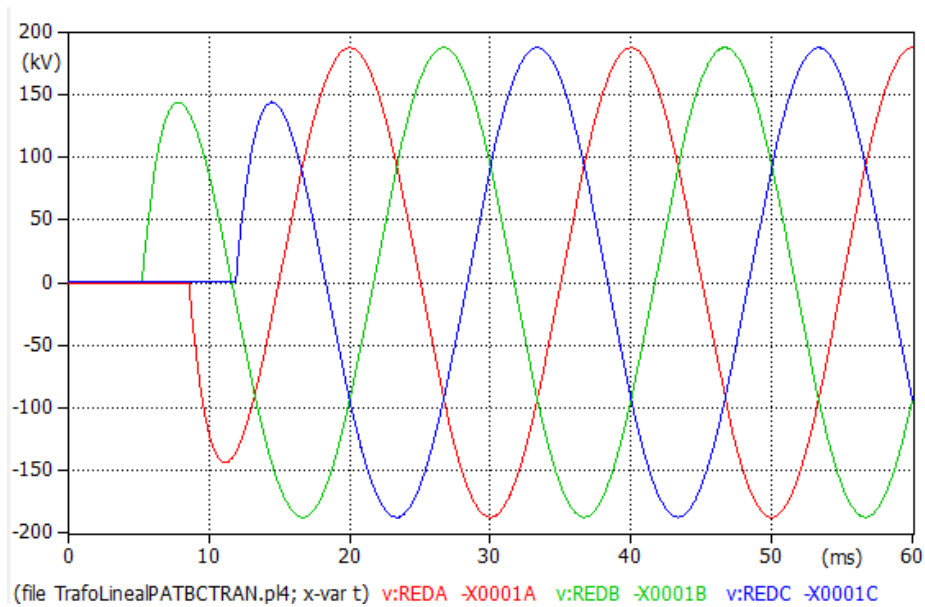


Figura 4-15 Tensión Transitoria de Restablecimiento con el neutro aislado. Caso lineal. Curva Roja: Tensión fase A. Curva Verde: Tensión fase B. Curva Azul: Tensión fase C.

4.3.4. Transitorio de desconexión del transformador en vacío con el neutro aislado usando el modelo BCTRAN

El circuito utilizado en el estudio puede verse en la figura 4-16

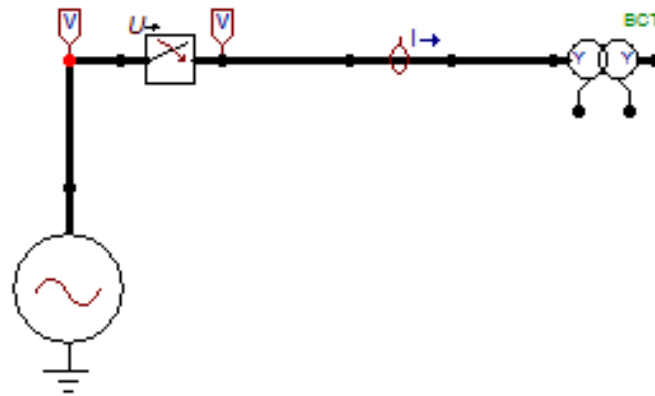


Figura 4-16 Circuito apertura interruptor BCTRAN con neutro aislado.

Una vez más la primera simulación realizada para este modelo de transformador es la corriente de vacío la cual se muestra en la figura 4-17. Como se observa la corriente sigue el comportamiento teórico esperado, es decir, después que la fase B se extinga las otras dos se vuelven simétricas. Es el comportamiento teórico esperado.

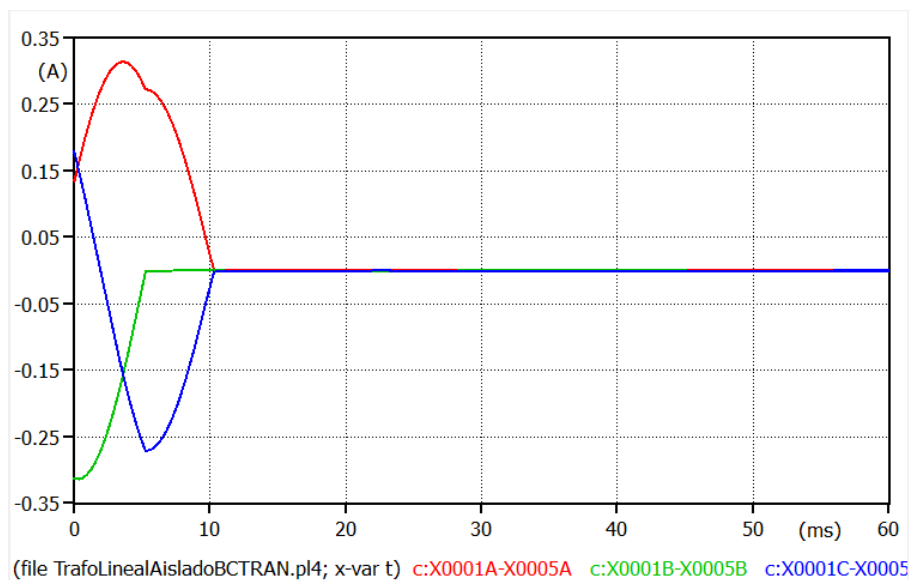


Figura 4-17 Corriente de vacío del transformador BCTRAN con Neutro Aislado. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C

Seguidamente se ha procedido a la obtención de la TTR, como se ha hecho en los casos anteriores y como vemos en la figura 4-18 sigue un comportamiento correcto. Puesto que se aprecia el factor de primer polo, el cual consiste en que el primer polo en abrir sufre 1,5 veces más tensión que los otros dos y vemos que esto si se produce. Lo cual se justificó en la imagen 4-18. Por tanto para este caso, el comportamiento del modelo BCTRAN es el adecuado.

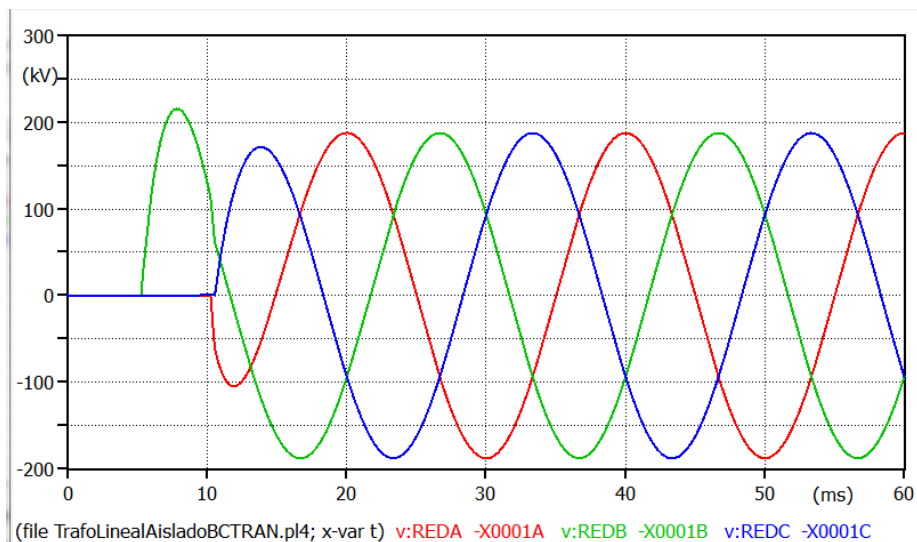


Figura 4-18 Tensión Transitoria de Restablecimiento del transformador BCTRAN con el neutro aislado. Caso lineal.
Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.

4.4. Conclusiones

Como conclusión de lo visto el modelo XFMR presenta un comportamiento no deseable en vacío, puesto que las simulaciones con las capacidades nulas, no se obtiene el comportamiento teórico adecuado y cuando en las capacidades se introducen los valores de ensayo tampoco responde correctamente, por tanto no se utilizará en el presente trabajo.

Como se verá, estas mal funciones no se presentan en el modelo BCTRAN, y por tanto éste será el elegido para desarrollar el presente Trabajo Fin de Grado.

Como se indicó el modelo BCTRAN no tiene en cuenta las capacidades parásitas, pero es posible incluir el efecto de dichas capacidades mediante capacidades externas conectadas convenientemente.

Otro aspecto que debe ser tenido en cuenta mediante elementos externos es la no linealidad de la corriente de vacío, pues mientras el modelo XFORMER permite utilizar una curva de Frolich, en modelo BCTRAN para poder recurrir al comportamiento no lineal, deberá añadir al circuito de simulación inductancias variables de corriente, que se conectará en bornas del transformador. Todo lo comentado se verá en el capítulo 6.

CAPITULO 5: OBTENCION DE LA CORRIENTE DE VACIO

En un transformador de potencia existen unas capacidades parásitas entre arrollamientos y entre arrollamientos y tierra. Por esa razón cuando en el ensayo de vacío se mide la corriente consumida por el transformador, en realidad no se está midiendo la corriente magnetizante sino la suma de la corriente magnetizante más la corriente consumida por las capacidades parásitas. Sin embargo, a la hora de modelar el transformador es indispensable diferenciar entre las dos corrientes mencionadas. Esto ya ha sido observado por otros autores [Martínez, Mork], que indican que si no se diferencia entre corriente de vacío y corriente magnetizante la curva de vacío tiene forma de “cobra” (figura 5-1).

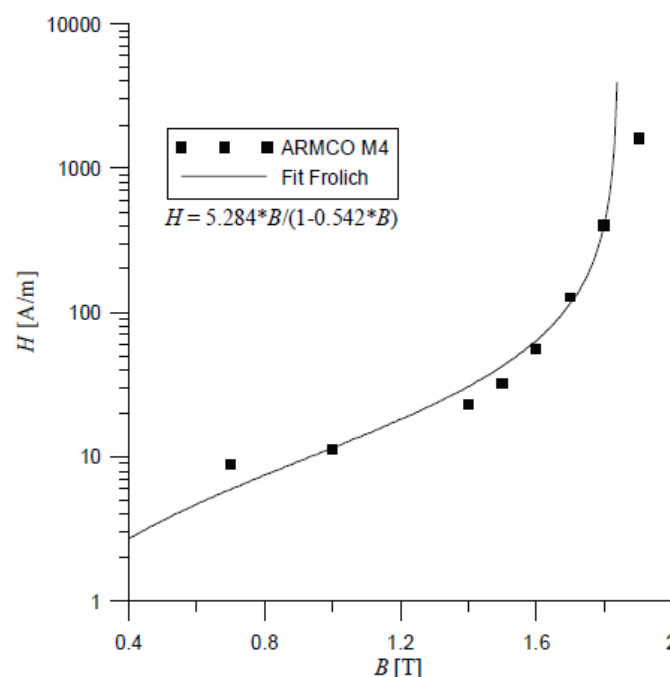


Figura 5-1 Curva de magnetización del ensayo de Mork y Martínez.

En el presente capítulo de este Trabajo Fin de Grado, se va a proceder a calcular la corriente de magnetizante a partir de la corriente de vacío medida en los ensayos de fábrica y del valor de las capacidades medido también en dichos ensayos.

En el capítulo anterior, para hacer las simulaciones pertinentes usamos un modelo de transformador con dos arrollamientos, pero los datos de partida del transformador que se escogieron corresponden a un transformador de tres arrollamientos. La razón de modelar el transformador como un transformador de dos arrollamientos es la siguiente: al ser este trabajo innovador en esta Universidad parece lógico comenzar a analizar un problema más sencillo en lugar de un problema más complejo. Unido a ello la carga crediticia de un Trabajo Fin de Grado tiene es limitada, por lo que no hay tiempo para abordar ambos problemas.

No obstante para el cálculo de la corriente magnetizante es indispensable utilizar el modelo real de transformador de tres arrollamientos para poder llegar a una conclusión más cercana a la realidad.

4.5. Obtención de la corriente magnetizante a partir de la corriente de vacío del transformador

Los datos del transformador utilizado son los siguientes:

Parámetros	Valor
Potencia Primario [MVA]	150 [MVA]
Tensión Primario [kV]	230 [kV]
Potencia Secundario [MVA]	150 [MVA]
Tensión Secundario [kV]	71 [kV]
Potencia Terciario [MVA]	50 [MVA]
Tensión Terciario [kV]	20 [kV]
Grupo de Conexión	Yyd
Desfase	330°
Tipo de Núcleo	Triplex
Tiempo de simulación [s]	0.060 [s]

Tabla 5-1 Datos del transformador usado.

Las capacidades entre arrollamientos entre fases y tierra, las cuales han sido obtenidas de los valores de ensayo se muestran en la tabla 5-2.

Capacidades originales	Capacidades por arrollamiento [nF]	Capacidades por fase [nF]
P-G	4,5759	1,525
S-G	12,89	4,296
P-S	6,7929	2,2643
T-G	1,0478	0,34926
S-T	0,13175	0,04391
T-P	24,292	8,0973

Tabla 5-2 Capacidades de ensayo.

En realidad las capacidades medidas en los ensayos de fábrica son las capacidades entre el las tres fases de un arrollamiento cualquiera y tierra, y nosotros estamos más interesados en la capacidad entre una fase y tierra, por lo que las capacidades que se deben considerar son las de la tercera columna de la tabla 5-2.

La figura 5-2 muestra las capacidades parásitas entre los arrollamientos alojados en una fase cualquiera del transformador y entre éstos y tierra.

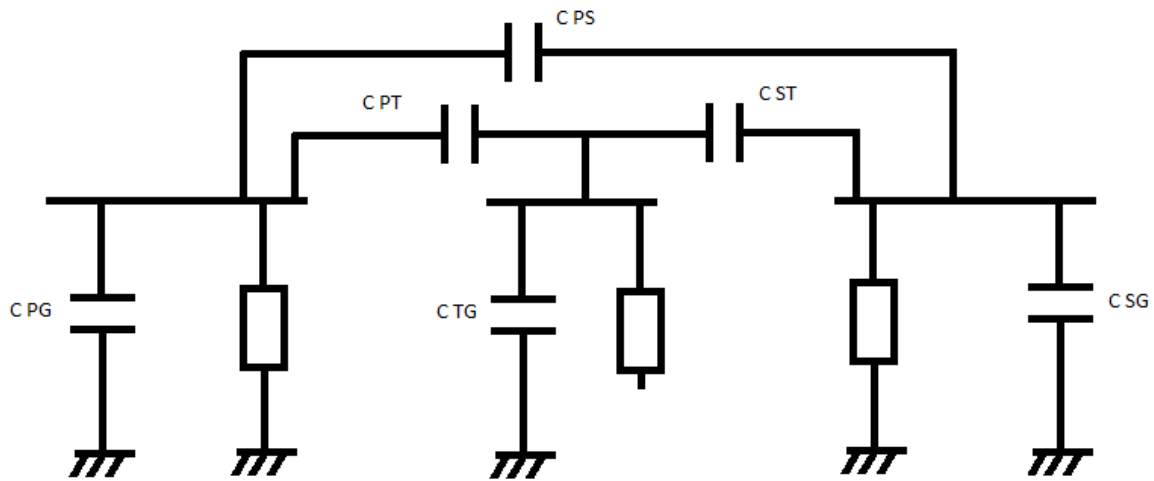


Figura 5-2 Circuito eléctrico del transformador.

En primer lugar se debe calcular la capacidad total existente entre el arrollamiento primario y tierra durante el ensayo de vacío. Para ello es preciso simplificar el esquema los valores de capacidades del transformador. Para ello se deben pasar las capacidades entre arrollamientos de triángulo a estrella, para ello se usará el teorema de Kenelly que permita convertir un circuito en estrella en otro en triángulo, como se muestran en la figura 5-3.

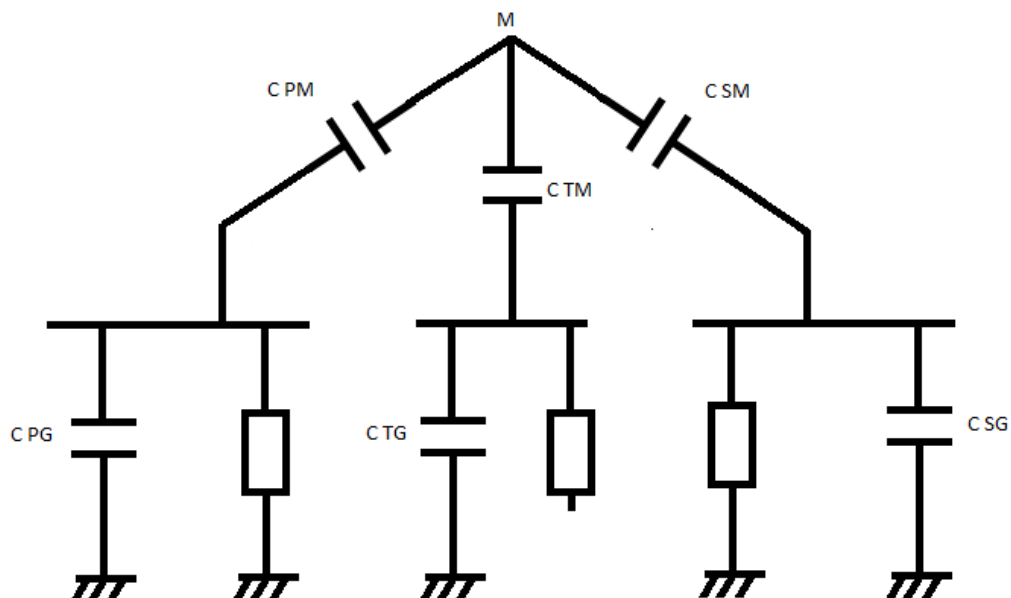


Figura 5-3 Impedancias en triángulo y estrella

Las transformaciones de Kenelly consisten en aplicar las siguientes ecuaciones:

$$C_{mA} = \frac{C_{TA} \cdot C_{BT} + C_{TA} \cdot C_{AB} + C_{BT} \cdot C_{AB}}{C_{BT}} \quad [1]$$

$$C_{mB} = \frac{C_{TA} \cdot C_{BT} + C_{TA} \cdot C_{AB} + C_{BT} \cdot C_{AB}}{C_{AB}} \quad [2]$$

$$C_{mC} = \frac{C_{TA} \cdot C_{BT} + C_{TA} \cdot C_{AB} + C_{BT} \cdot C_{AB}}{C_{TA}} \quad [3]$$

Los valores obtenidos en las ecuaciones anteriores se muestran en las ecuaciones 4 a la 6.

$$C_{mA} = 4,276 \cdot 10^{-7} \text{ F} \quad [4]$$

$$C_{mB} = 8,298 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad [5]$$

$$C_{mT} = 2,319 \cdot 10^{-7} \text{ F} \quad [6]$$

En el ensayo de vacío del transformador los arrollamientos de BT y terciario no llevan corriente alguna, con lo que puede prescindirse de ellos como se muestra en la figura 5-4.

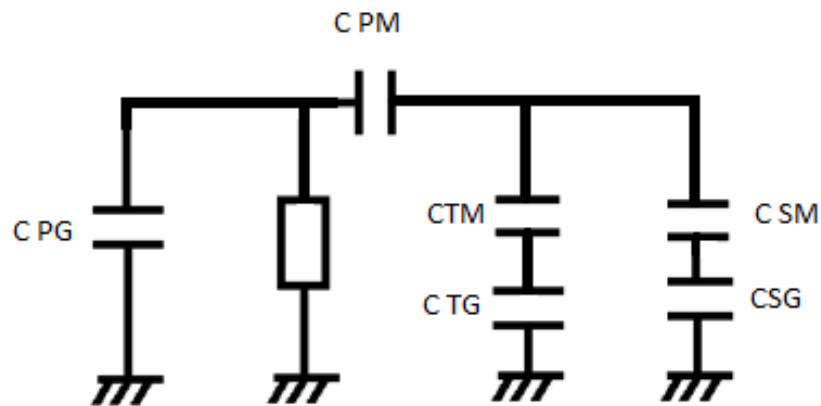


Figura 5-4 Transformación triángulo-estrella simplificada.

De esta manera las capacidades C_{mT} y C_{Tg} quedan en serie, con lo que la capacidad resultante es:

$$C_{Equi.Terciario} = \frac{C_{mT} \cdot C_{Tg}}{C_{mT} + C_{Tg}} \quad [7]$$

Obteniendo un valor de:

$$C_{Equi.Terciario} = 3,036 \cdot 10^{-10} \text{ [8]}$$

Lo mismo se puede decir para el caso de la capacidad equivalente de baja tensión, se aplica la ecuación 9.

$$C_{Equi.Baja} = \frac{C_{mB} \cdot C_{Bg}}{C_{mB} + C_{Bg}} \text{ [9]}$$

Y se obtiene un valor de la capacidad equivalente de baja mostrado en la ecuación 10:

$$C_{Equi.Baja} = 2,831 \cdot 10^{-9} \text{ F [10]}$$

Una vez calculadas las capacidades equivalentes del terciario y del secundario, el circuito quedaría como se muestran en la figura 5-5.

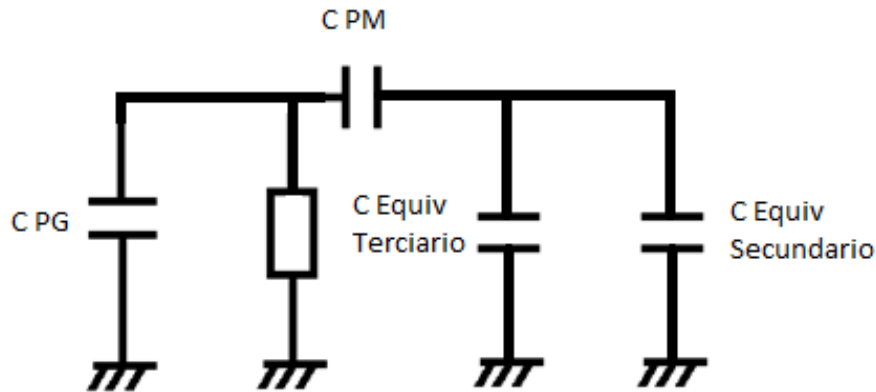


Figura 5-5 Transformación triángulo-estrella simplificada.

Se calcula la capacidad equivalente 1, que sería el paralelo entre la capacidad entre el terciario y la capacidad del secundario:

$$C_{Equi.1} = C_{Equi.Baja} + C_{Equi.Terciario} \text{ [11]}$$

De donde se obtiene un valor de:

$$C_{Equi.1} = 3,134 \cdot 10^{-9} \text{ F [12]}$$

El circuito resultante de estas simplificaciones es el mostrado en la figura 5-6.

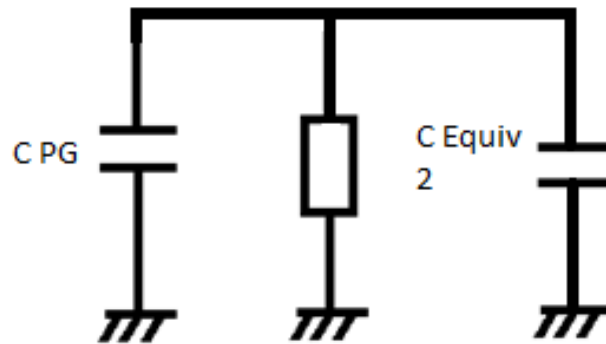


Figura 5-6 Transformación triangulo-estrella simplificada.

Para proseguir con el cálculo de simplificación del circuito equivalente, aplicamos la ecuación 13.

$$C_{Equi.2} = \frac{C_{Equi.1} \cdot C_{mA}}{C_{Equi.1} + C_{mA}} \quad [13]$$

Obteniendo un valor:

$$C_{Equi.2} = 3,112 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad [14]$$

El último paso relacionado con la simplificación de capacidades se muestra a continuación:

$$C_{Equi.3} = C_{Equi.2} + C_{Ag} \quad [15]$$

Y se obtiene un valor:

$$C_{Equi.3} = 4,637 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad [16]$$

El circuito simplificado aparece en la figura 5-7, como ya está totalmente el circuito reducido se procede a calcular la impedancia del condensador.

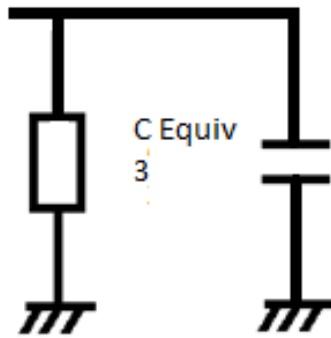


Figura 5-7 Transformación triángulo-estrella simplificada.

Para calcular la impedancia se aplica la ecuación 17.

$$Z_{Cond} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot C_{Equi.3}} \quad [17]$$

De donde se obtiene un valor de:

$$Z_{Cond} = 3714,79 \, \Omega \quad [18]$$

Una vez obtenida la impedancia a tierra que presentan las capacidades, se calcula la corriente que se deriva a tierra a través de ellas, como se puede observar en la ecuación 18.

$$I_{Cond} = \frac{U_{FN}}{Z_{Cond}} \quad [18]$$

Introduciendo los valores pertinentes en la ecuación 18, se obtiene un valor de:

$$I_{Cond} = 35,74 \, A \quad [19]$$

Para obtener la corriente magnetizante se emplea la ecuación 20.

$$I_{Magnetizante} = I_{Cond} + I_{Medida} \quad [20]$$

Consiguiendo el siguiente resultado.

$$I_{Magnetizante} = 35,968 \, A \quad [21]$$

Y para obtener el porcentaje de la corriente de vacío se emplea la ecuación 22.

$$I_{Magnetizante} = \frac{I_{Magnetizante}}{I_N} \cdot 100 \quad [22]$$

Donde la corriente asignada vale

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad [23]$$

Introduciendo los valores de la tabla 5-1 mostrada al principio de este capítulo, se obtiene el valor correspondiente a la corriente nominal:

$$I_N = 376,5 \text{ A} \quad [24]$$

Finalmente, introduciendo el valor de la ecuación 24, en la ecuación 23 se consigue un valor de corriente magnetizante:

$$I_{Magnetizante} = 9,55 \% \quad [25]$$

CAPÍTULO 6: TRANSITORIO DE DESCONEXIÓN DE TRANSFORMADORES EN VACIO

En este capítulo se estudian el transitorio de desconexión de un transformador, analizando la cuantía de la sobretensiones en función de una serie de parámetros, tales como el valor de la corriente cortada, el valor de las pérdidas en el hierro, etc. También analizaremos el efecto de la no linealidad del núcleo magnético.

A lo largo de todo el capítulo se admite que el transformador es un banco de tres transformadores monofásicos, pues ello permite que los flujos de las tres fases sean independientes entre sí. El estudio de un transformador de núcleo trifásico requeriría bastante más tiempo y por tanto se sale del alcance de este Trabajo Fin de Grado.

Estas sobretensiones pueden ser limitadas por el uso de descargadores y autoválvulas que actúan en caso de que la sobretensión sea muy elevada.

En el presente capítulo se analizará el transitorio de desconexión del transformador en vacío. En transitorio a analizar es un transitorio complejo en el que sería muy difícil justificar la causa de las diferentes observaciones que se pueden realizar sobre las formas de onda de tensión e intensidad obtenidas. Por ello se ha decidido analizar el problema descomponiéndolo en problemas con un grado de dificultad creciente, de forma que comparando las formas de onda obtenidas en dos casos consecutivos se pueda conocer el efecto de cada uno de los fenómenos introducidos.

De esta manera inicialmente se modelará un transformador con una curva de magnetización lineal y sin pérdidas. Seguidamente se introducirá el efecto de las pérdidas. A continuación se considerará que la curva de magnetización del transformador es no lineal. De nuevo se diferenciara entre transformador sin pérdidas y transformador con pérdidas.

El capítulo finaliza mostrando el efecto que tiene el considerar la existencia de un arrollamiento en triángulo cerrado sobre el transitorio objeto de análisis.

6.1. Transitorio de desconexión transformador lineal sin pérdidas

En la figura 6.1 se muestra el circuito utilizado para la simulación. Se ha considerado una única capacidad entre el lado de Alta Tensión (AT) y tierra de valor $4,637 \cdot 10^{-7}$ F. Como se vio en el capítulo precedente esta capacidad incluye el efecto de las corrientes capacitivas que se derivan a tierra por las capacidades entre Baja Tensión (BT) y tierra y por las capacidades entre terciario y tierra.

Para este primer caso supondremos que las pérdidas del transformador son nulas. El objetivo de las simulaciones es obtener el valor de cresta de las sobretensiones en función de la corriente arrancada (I_{mar}) por el interruptor trifásico en el instante de la apertura.

El circuito a utilizado para este caso es el mostrado en la figura 6-1.

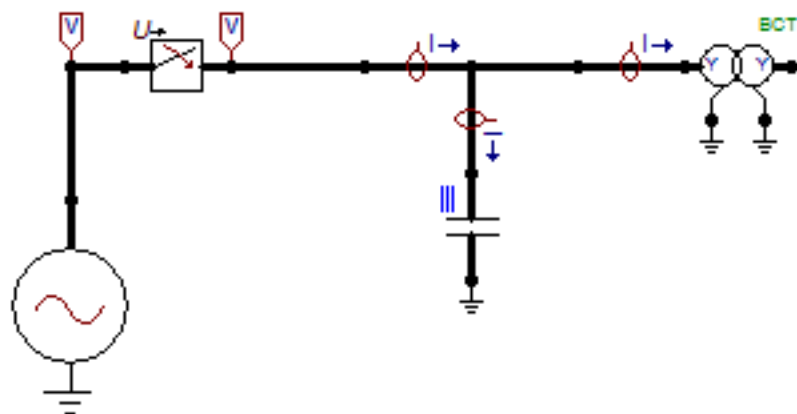


Figura 6-1 Circuito simulación con BCTRAN

Como se puede observar en la figura 6-1 el neutro del transformador está puesto a tierra tanto en el lado de alta como en el de baja. En un primer momento se ha supuesto que el valor de la corriente arrancada (I_{mar}) es igual a cero y la orden de apertura del interruptor se da en el instante de 5 ms (figura 6-2) que justo coincide con un máximo de la onda de tensión. Esto se ha decidido así puesto que lo que nos interesa es saber cuál es el caso más severo de sobretensiones.

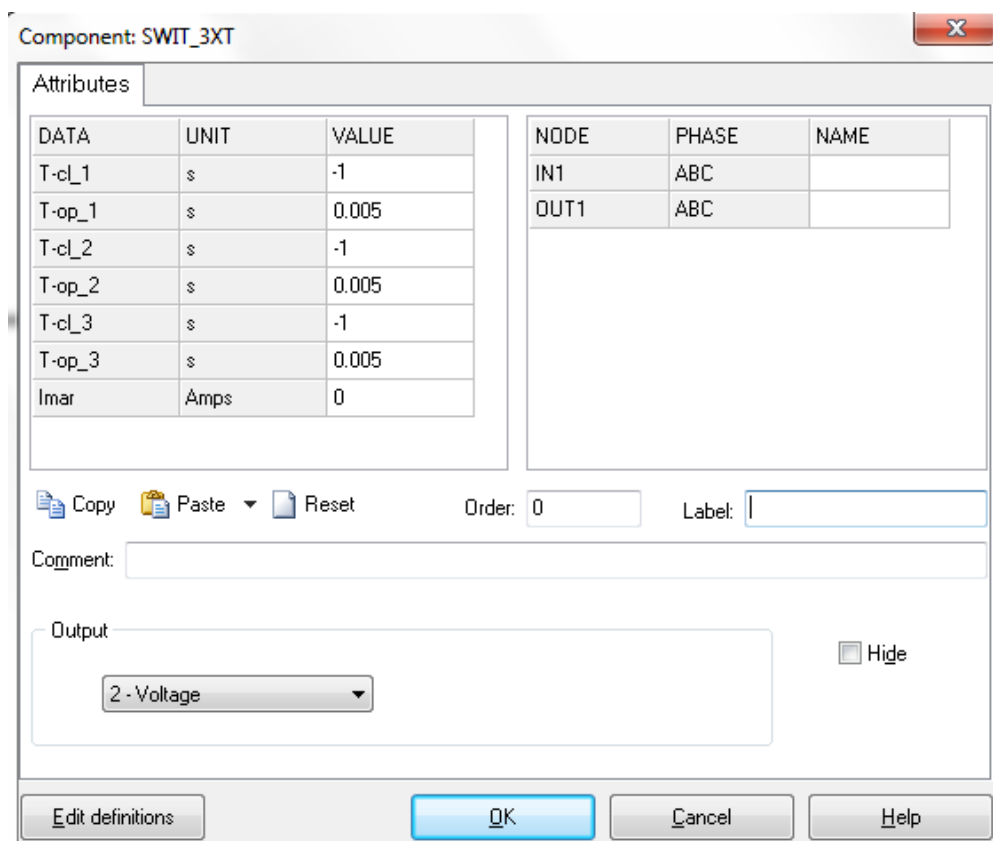


Figura 6-2 Ajuste del interruptor.

Los ajustes del transformador se muestran en la figura 6-3

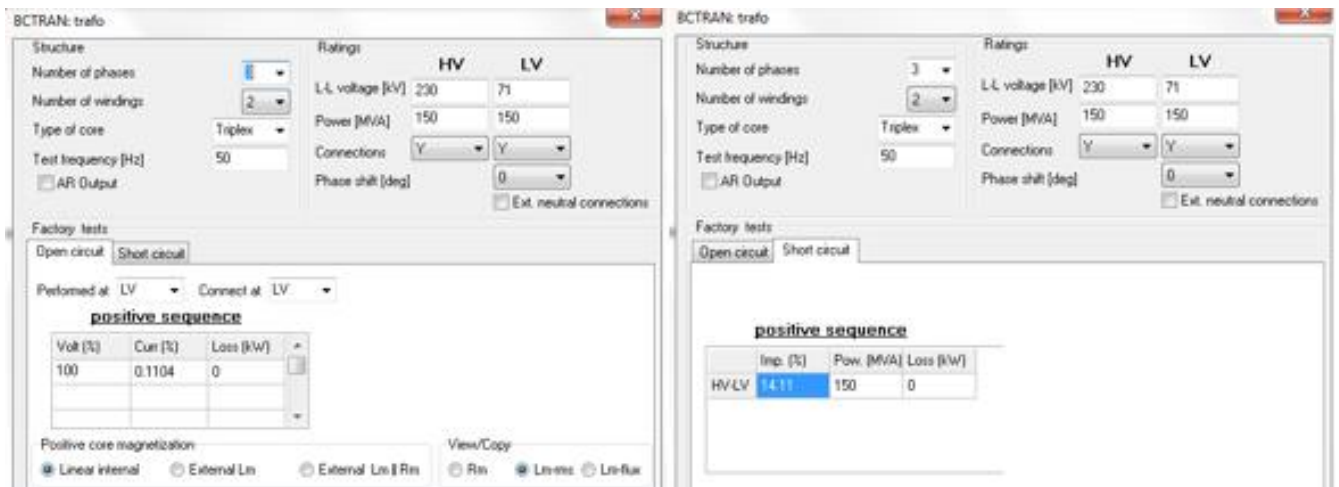


Figura 6-3 Ajustes del transformador

El valor de la capacidad ha sido calculado en el apartado 5.1 en la ecuación 20. El valor de la corriente magnetizante es el calculado en el capítulo anterior.

Teniendo en cuenta los valores de la corriente de vacío introducida y de la capacidad a tierra introducida los valores de cresta de la corriente en régimen permanente son los que aparecen en la tabla 6-1. La corriente total es la corriente efectivamente consumida por el transformador en vacío, suma vectorial de la precisa para crear el flujo magnético (corriente magnetizante) y la consumida por las capacidades parásitas.

	A-pico
Icapacidad	0,2736
Imagnetizante	0,5877
Itotal	0,3142

Tabla 6-1 Valores teóricos esperados tras la simulación.

A continuación se muestra el resultado de la simulación realizada. En la figura 6-4 se muestra la intensidad total (que es la que circula por el interruptor), la intensidad magnetizante del transformador y la que circula por las capacidades parásitas. Estas tres corrientes corresponden a la fase A del transformador, ya que las corrientes en las otras dos fases no aportan novedades respecto a las de la figura 6-4.

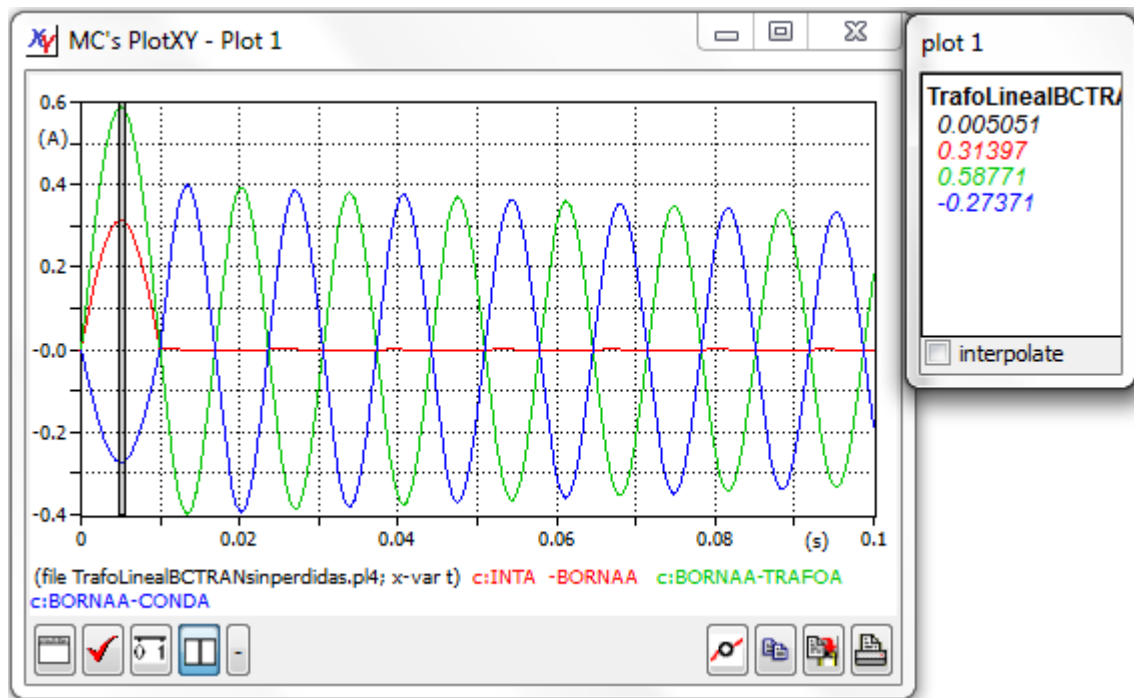


Figura 6-4 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)

Aunque la orden de apertura del interruptor se da en el instante de $t=5$ ms, la apertura efectiva del interruptor se produce en $t=10$ ms, ya que en este caso el interruptor no tiene capacidad de arranque de corriente. Dado que en el instante en el que se extingue la corriente en el interruptor la tensión en bornas del transformador no es cero (de hecho pasa por su valor máximo), aunque el transformador esté desacoplado de la red, la corriente magnetizante sigue circulando, pero en esta ocasión cerrando su camino por la capacidad parásita.

El valor de las corrientes obtenidas antes de la apertura del interruptor coincide con los valores teóricos esperados, que se mostraron en la tabla 6-1.

Otros parámetros que se han calculado para comprobar las simulaciones ha sido el periodo de las oscilaciones que se producen después de la apertura del interruptor. Para calcular el periodo natural, aplicaremos la siguiente fórmula:

$$T_{natural} = \frac{1}{f_{natural}} \text{ s [26]}$$

Donde la frecuencia natural viene dada por la ecuación 27.

$$f_{natural} = \frac{1}{\sqrt{L_m \cdot C}} \text{ Hz [27]}$$

La capacidad la calculamos en el capítulo anterior en la ecuación 17, por tanto solo quedaría calcular L, para ello aplicamos la siguiente ecuación:

$$X_m = \frac{U_{Nominal}}{Corriente\ magnetizante} \Omega \quad [28]$$

Una vez conocida X_m calculamos L_m como:

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot 50} H \quad [29]$$

Con el valor de L_m calculamos la frecuencia natural:

$$f_{natural} = 73,29 Hz \quad [30]$$

Y con el valor mostrado en la ecuación 30 procedemos a calcular el periodo con la ecuación 26 y obtenemos el siguiente valor:

$$T_{natural} = 1,364 \cdot 10^{-2} s \quad [31]$$

Ahora calcularemos el periodo medido para ello vamos a la gráfica 6-5 y obtenemos el valor de 0,01389 s, con esto observamos que la simulación está correctamente realizada.

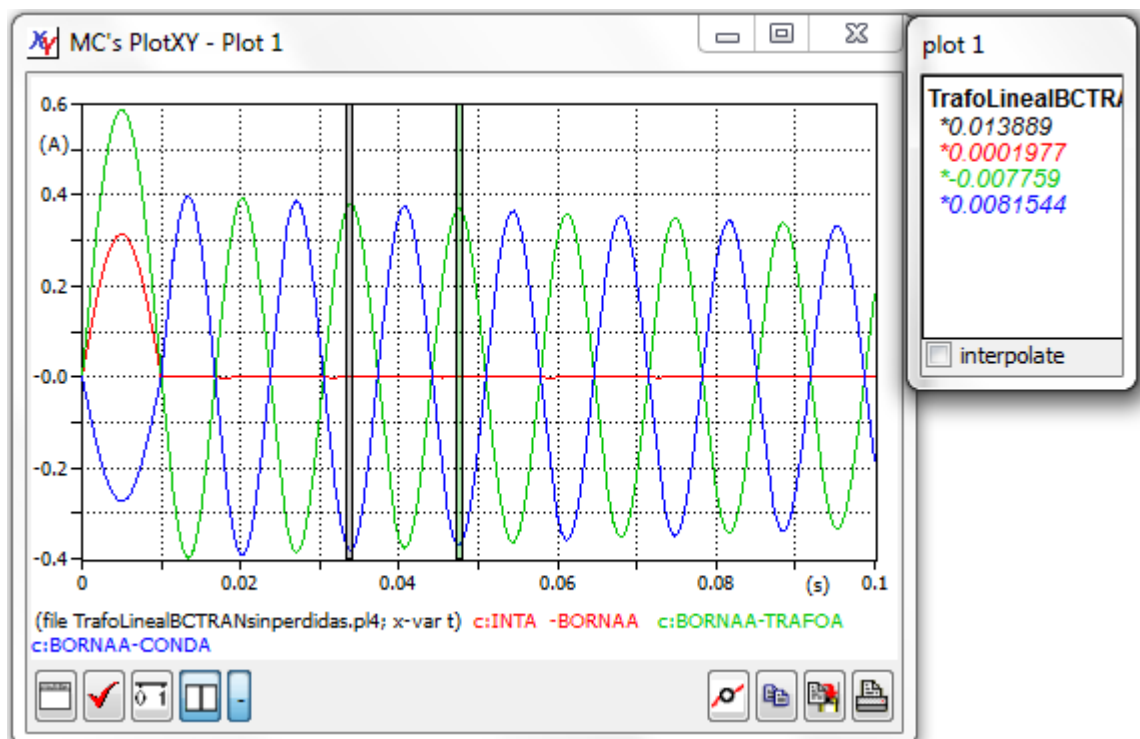


Figura 6-5 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)

Una vez comprobada que la simulación está realizada correctamente procedemos al cálculo de la sobretensión.

En el momento de la apertura del interruptor se tiene una energía almacenada en el núcleo magnético y una energía almacenada en las capacidades parásitas. A partir de dicho momento se producen unas oscilaciones con la frecuencia anteriormente calculada, de forma que la tensión en bornas del transformador comienza a diferir respecto de la tensión de la red, como se muestra en la figura 6-6.

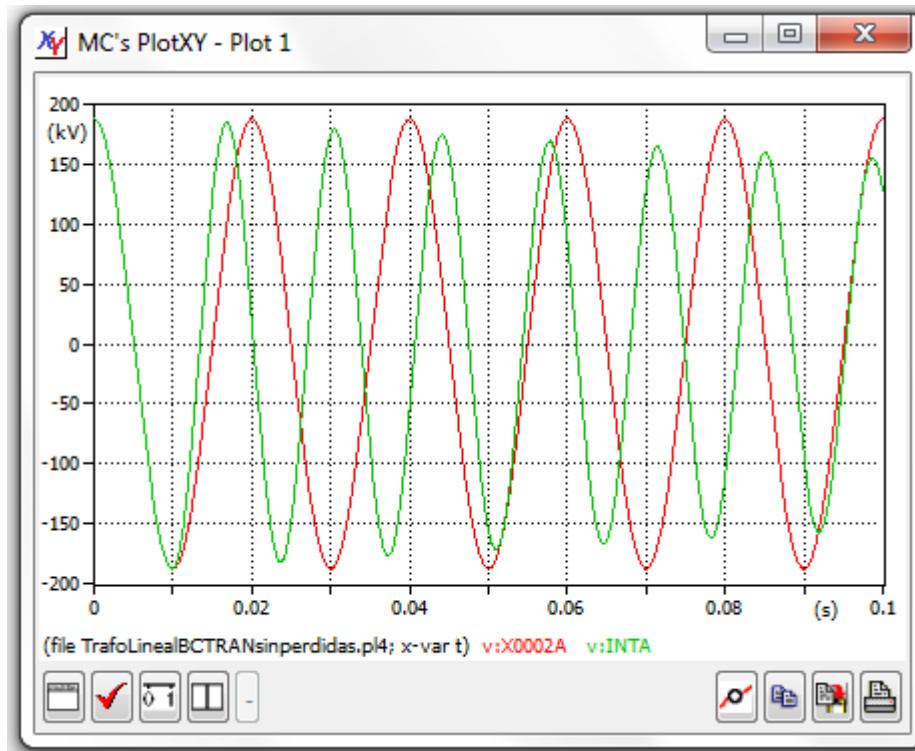


Figura 6-6 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde).

El valor máximo de la tensión se da cuando toda la energía queda almacenada en la capacidad parásita, todo ello se comentó en el capítulo 3, donde se explicó con detalle el transitorio de desconexión. Por tanto aplicando un balance de energía al circuito obtenemos:

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{max}^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{mag}^2 + \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{desconexión}^2 \quad [32]$$

Donde, la tensión máxima será:

$$U_{max} = \sqrt{\frac{L}{C} \cdot I_{mag}^2 + U_{desconexión}^2} \quad [33]$$

En el caso en estudio la intensidad en la bobina en el momento de la apertura efectiva del interruptor es nula. En dicho instante de tiempo la onda de tensión pasa por un máximo, porque en el estudio se han considerado las pérdidas nulas. Por tanto la máxima tensión que se da para este caso, será:

$$U_{max} = \sqrt{\frac{L}{C} \cdot 0^2 + 187,8^2} = 187,8 \text{ kV} \quad [34]$$

Como se muestra en la figura 6-6. No obstante, en dicha figura se aprecia que el valor de cresta de la tensión disminuye de una oscilación a la siguiente. Esto no es lo esperado, ya que no se han considerado las pérdidas en ninguno de los elementos. La causa más probable de ese resultado inesperado es que ATP no contempla la existencia de interruptores ideales, por lo que seguramente internamente el interruptor dispone de una resistencia en paralelo.

En las otras dos fases las sobretensiones son idénticas, ya que la puesta a tierra del neutro del transformador desacopla las tres fases entre sí, con lo que cada una de las corrientes pasa por cero en un instante de tiempo diferente y en esos tres instantes de tiempo las ondas de tensión respectivas pasan por su valor de cresta.

Si lo hacemos por fase las sobretensiones para cada fase son:

	<i>kV</i>
U max trns A	187,8
U max trns B	187,8
U max trns C	187,8

Tabla 6-2 Tensiones transitorias máximas con comportamiento lineal y corriente arranca 0A.

Apertura con arranque de corriente

Una vez que se ha calculado las sobretensiones con la corriente arrancada (*I*_{mar}) nula, se procederá a modificar el valor de esta a un valor de 0,15 A figura 6-7.

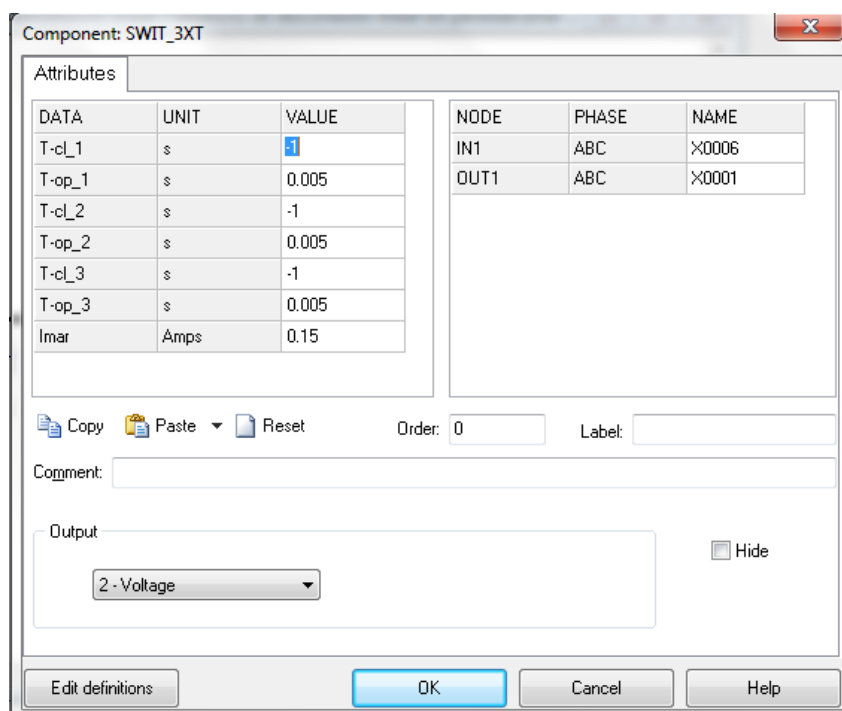


Figura 6-7 Ajustes del interruptor II

Los resultados de la simulación pertinente, se muestran en la figura 6-8.

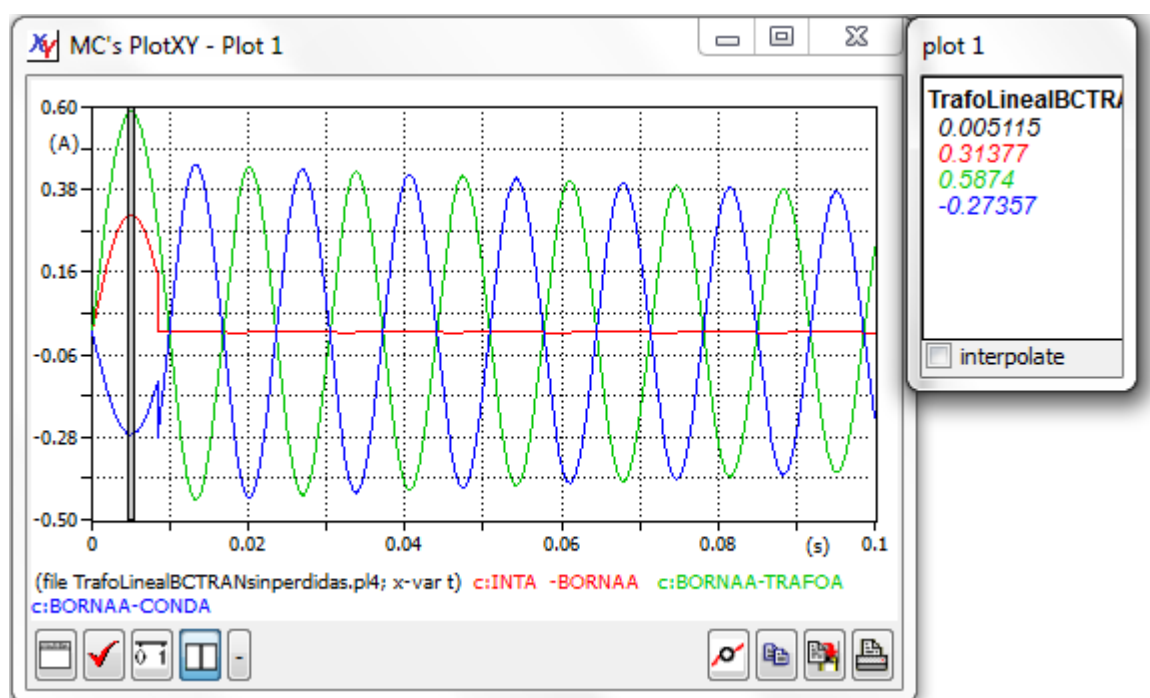


Figura 6-8 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) y corriente magnetizante (curva verde).

Como se puede observar la apertura del interruptor se realiza cuando el valor de la corriente es inferior a la corriente de arranque (I_{mar}), que para este caso es 0,15 A. Obsérvese que la orden de apertura del interruptor se da en el instante $t=5\text{ms}$, pero hasta que la corriente no alcanza el valor de 0,15 A, no se produce la apertura, y esto sucede en 8 ms. Dado que en la bobina no se puede producir una discontinuidad de la corriente, el condensador coge la forma de onda la corriente de red para que todo sea correcto. Puesto que en un condensador la corriente puede ser discontinua.

Tras observar este comportamiento, que es el esperado teóricamente, observamos que la modificación de la corriente de arranque no afecta a los valores de corriente que se mostraron en la tabla 6-1.

Cuando hay arranque de corriente las sobretensiones difieren de las obtenidas en el caso de que la corriente se extinga en un paso por cero, como se observa en la tabla 6-3.

	kV
U max trns A	211.2
U max trns B	217.7
U max trns C	205.0

Tabla 6-3 Tensiones máximas cuando la corriente arrancada es 0,15 A y no se tiene en cuenta el efecto de las pérdidas.

Las sobretensiones calculadas en este caso serían:

$$U_{max} = \sqrt{\frac{L}{C} \cdot I_{mag}^2 + U_{desconexión}^2} \quad [35]$$

Donde I_{mag} es la corriente magnetizante en el instante de tiempo en el que la corriente en el interruptor es 0,15 A. En ese instante de tiempo la corriente magnetizante vale 0,287 A. Igualmente $U_{desconexión}$ es el valor de la tensión en la fase A en dicho instante de tiempo, 163.100 V. Con ello

$$U_{max} = \sqrt{\frac{L}{C} \cdot 0,287^2 + 163,1^2} = 211,265 \text{ kV} \quad [36]$$

El mayor valor de la sobretensión se obtiene cuando la corriente arrancada por el interruptor (I_{mar}) es el valor de cresta de la corriente, esto es 0,4 A, como se puede ver en la figura 6-9.

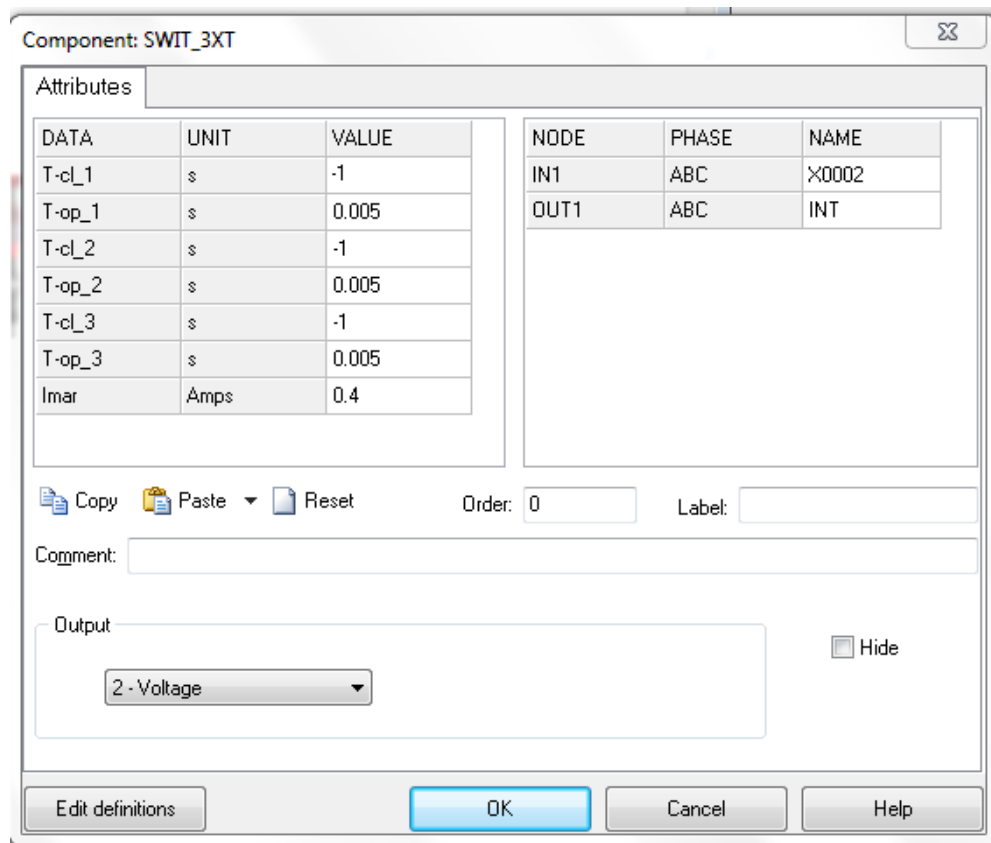


Figura 6-9 Ajuste del interruptor III.

Tras la modificación de la corriente arrancada, se obtienen los siguientes resultados que se pueden observar en la figura 6-10.

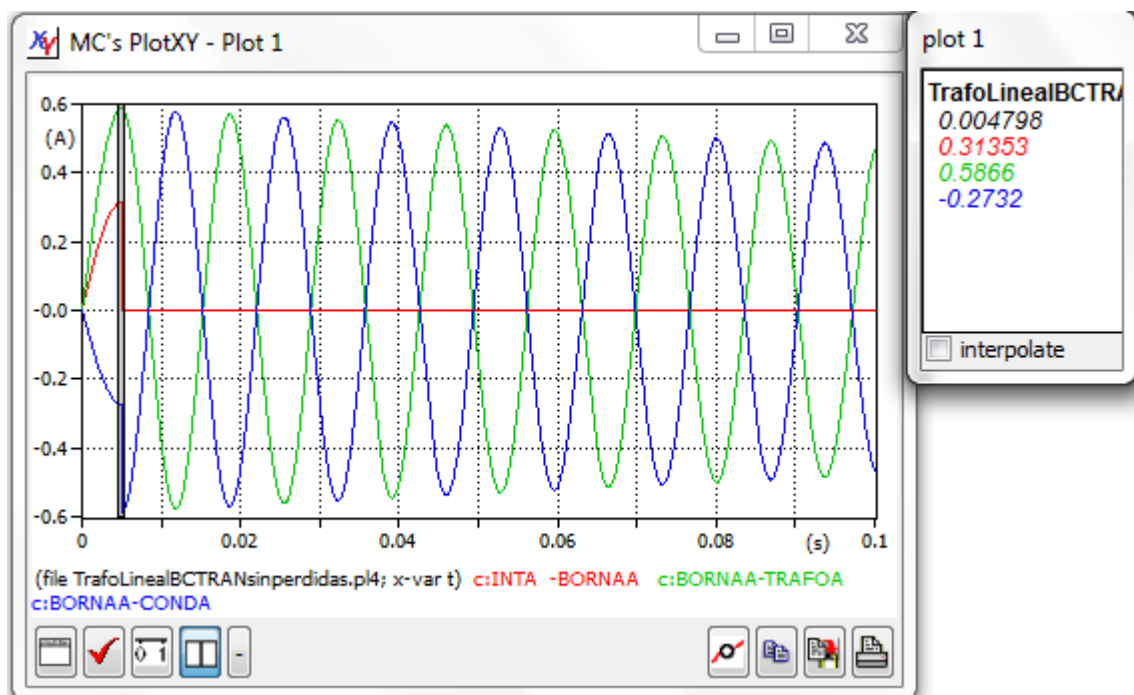


Figura 6-10 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) y corriente magnetizante (curva verde).

Para este caso, observamos como sí se produce la apertura del interruptor en el instante de 5 ms y también se puede observar como ocurre el mismo fenómeno de la continuidad de la corriente en la bobina y la discontinuidad de la corriente en el condensador.

Para este caso el valor de las sobretensiones se muestra en la tabla 6-4.

	kV
U max trns A	275.1
U max trns B	208.1
U max trns C	214.9

Tabla 6-4 Tensiones máximas cuando la corriente arrancada es 0,4 A y no se tiene en cuenta el efecto de las pérdidas.

6.2. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas

En este apartado del capítulo, vamos a ver la influencia de las pérdidas en las sobretensiones. Dentro de este apartado se han distinguido tres posibles casos:

- el transformador solo tenga pérdidas de vacío.
- el transformador solo tenga pérdidas de cortocircuito.
- el transformador tenga ambas pérdidas.

6.2.1. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas de vacío

Si solo consideramos que el transformador solo tiene las pérdidas de vacío, el ajuste del transformador sería el mostrado en la figura 6-11.

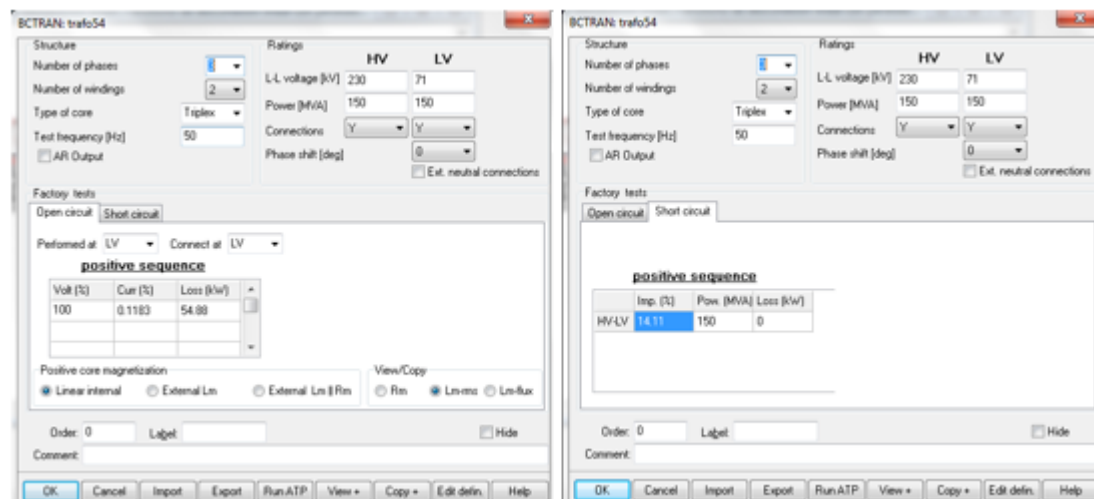


Figura 6-11 Ajuste del transformador

Para esta simulación se considera que el valor de la corriente arrancada del interruptor trifásico es nula. Lo cual se puede mostrar en la figura 6-12.

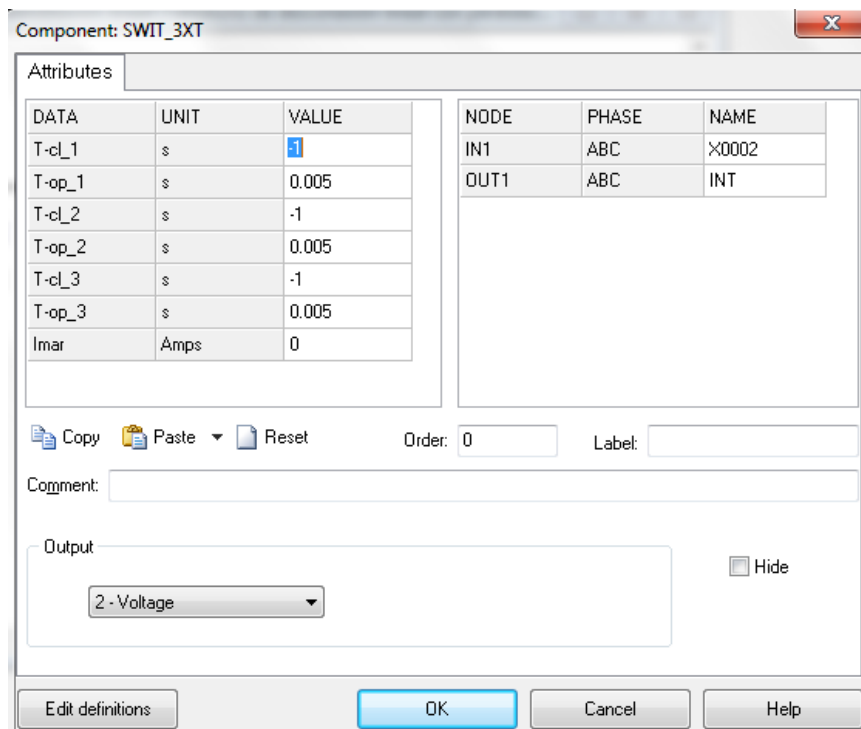


Figura 6-12 Ajuste del interruptor.

Una vez que han sido realizados todos los ajustes necesarios para esta simulación se procede a realizar esta última. Como se observa en la figura 6-12 se da la orden de apertura interruptor a los 5 ms, por ello vamos a centrar la atención en el valor de las corrientes en dicho instante de tiempo.

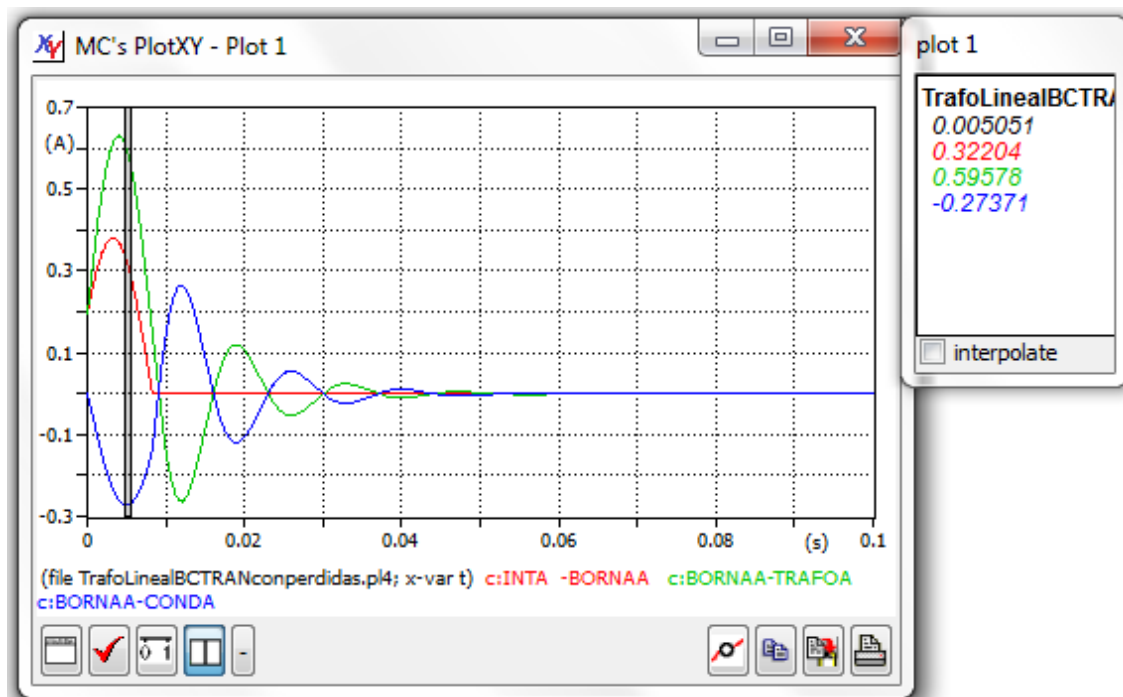


Figura 6-13 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) y corriente magnetizante (curva verde).

Como se observa en la figura 6-13, la apertura del interruptor no se produce a los 5 ms sino en el instante que $t=8$ ms, ya que en este caso el interruptor no tiene capacidad de arranque de corriente.

En la figura 6-14 se muestran las tensiones en la fase A. Se puede ver que en esta ocasión las sobretensiones se amortiguan de forma muy rápida, al disiparse la energía almacenada en la inductancia magnetizante y en las capacidades parásitas al ambiente en forma de calor.

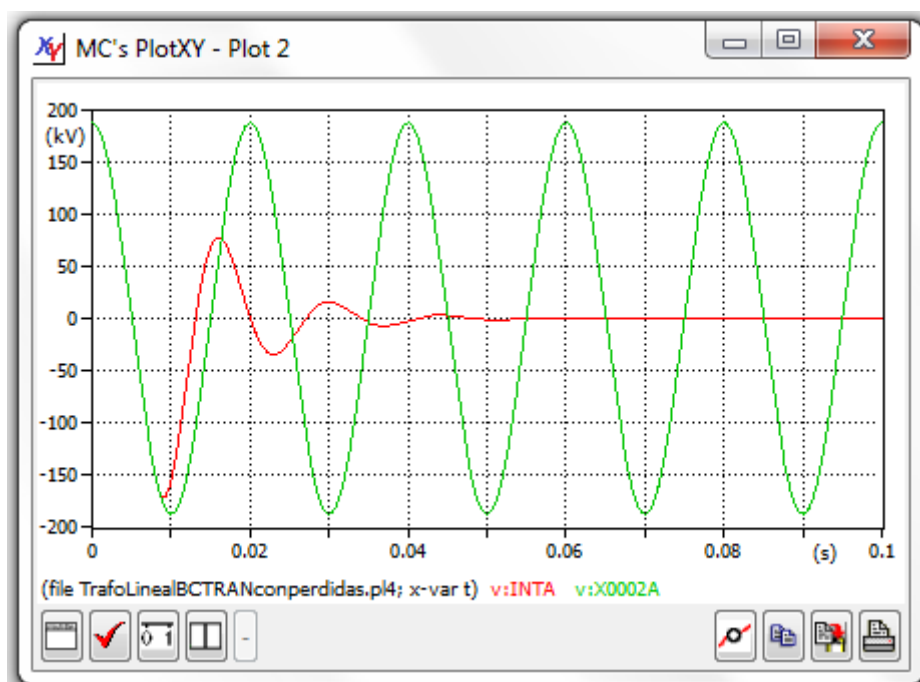


Figura 6-14 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)

Para este caso las sobretensiones se muestran en la tabla 6-5.

	kV
U max trns A	174.0
U max trns B	172.7
U max trns C	171.6

Tabla 6-5 Tensiones máximas con pérdidas de vacío y corriente arranque nula

Como se puede observar en el caso de que la corriente arrancada sea nula la tensión en bornas del transformador tiene un valor muy inferior al que tiene con el transformador en servicio, y por tanto no cabe hablar de sobretensiones en este caso.

Cabe preguntarse si habría sobretensiones en el caso de que hubiera arranque de corriente. Para responder a esta pregunta se modifica el valor de ajuste de la corriente arranque del interruptor trifásico. Se ha considerado un caso extremo en el que la corriente arrancada sea la máxima posible (0,4 A).

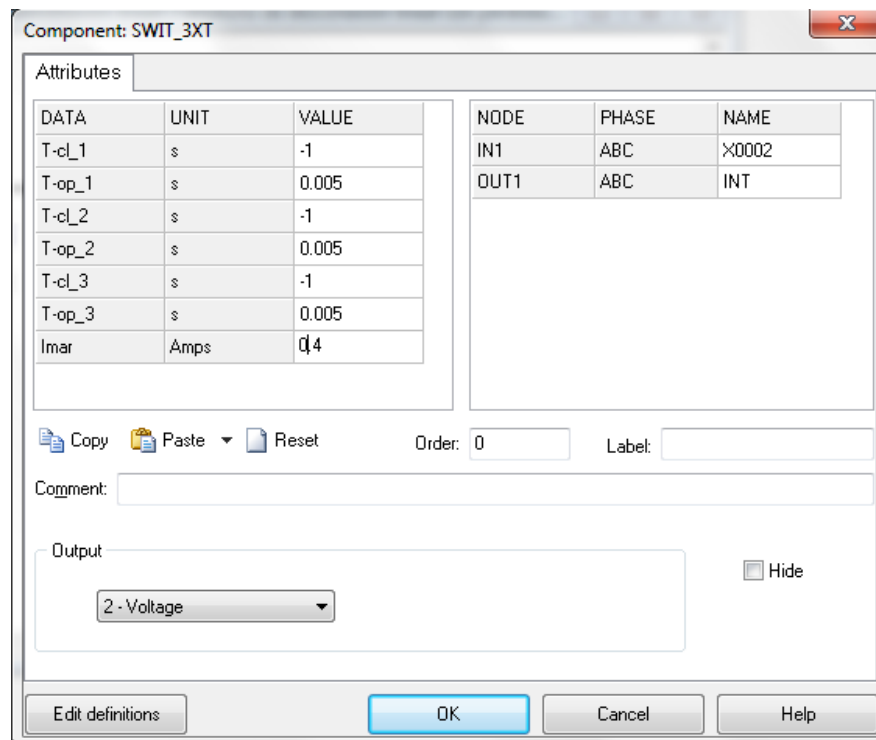


Figura 6-15 Ajuste del interruptor.

Una vez realizados los ajustes necesarios para esta simulación se procede a realizar esta última. Como se observa en la figura 6-15 se da la orden de apertura interruptor a los 5 ms, por ello vamos a centrar la atención en el valor de las corrientes en dicho instante de tiempo.

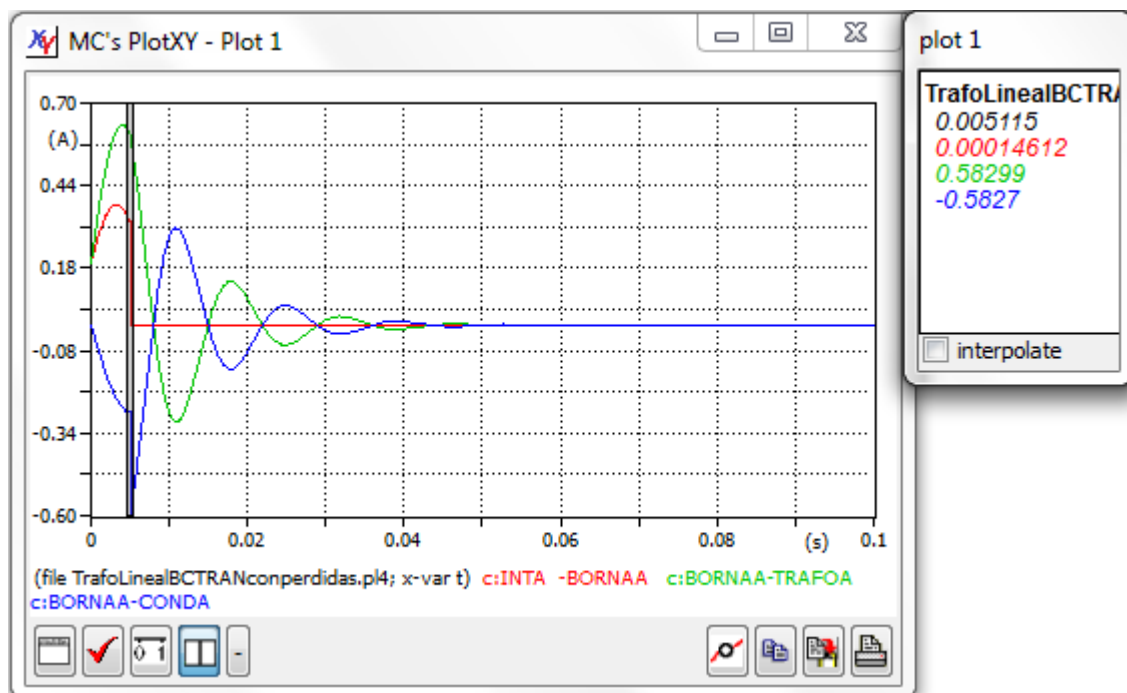


Figura 6-16 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)

El tiempo de apertura del interruptor ahora si que coincide con el momento en el que le damos la orden. De la figura 6-16 también se observa la discontinuidad de la corriente en el condensador.

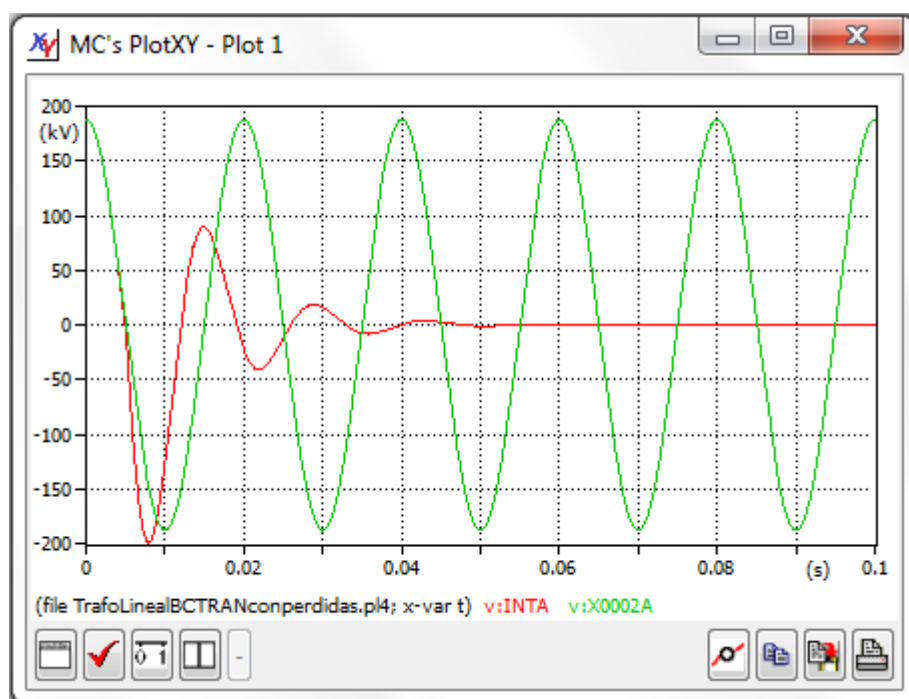


Figura 6-17 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)

Como se observa en la tabla 6-6 y en la figura 6.17 las sobretensiones para este subapartado alcanzan el valor de 196 kV ligeramente superiores al valor de cresta de la tensión en servicio. Por tanto en este caso las sobretensiones no son de consideración.

	kV
U max trns A	196.9
U max trns B	171.8
U max trns C	141.9

Tabla 6-6 Tensiones máximas con pérdidas de vacío y corriente arranca 0,4 A

6.2.2. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas de cortocircuito

Las pérdidas en cortocircuito se producen debido a la circulación de corriente por el transformador, a diferencia de las pérdidas en vacío que se deben a que el transformador tiene una tensión aplicada. Frecuentemente las pérdidas en cortocircuito son superiores a las pérdidas en vacío, sin embargo, al ser la corriente de vacío muy pequeña las pérdidas en el cobre son mucho más reducidas que las de vacío. En este apartado sólo se consideraran las pérdidas de cortocircuito, como se puede ver en la figura 6-18.

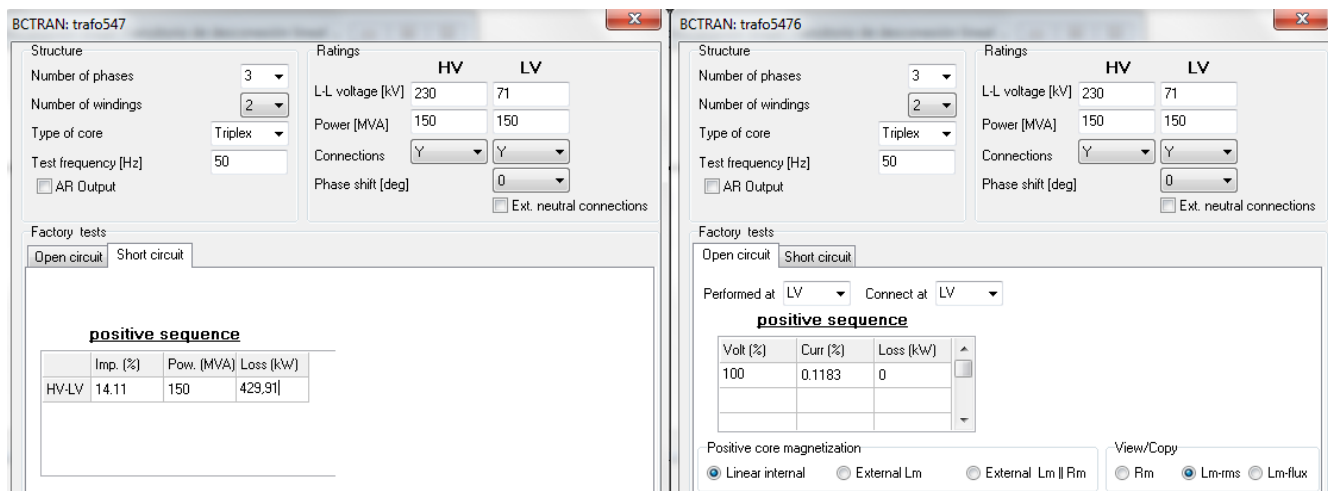


Figura 6-18 Ajustes del transformador

Tras realizar los ajustes oportunos en el transformador, y forzando el valor de la corriente arrancada (Imar) a ser nulo, no se obtienen sobretensiones. Como ya sucedía en caso anteriores las máximas tensiones que se producen son el valor cresta de la tensión fase en el transformador como se muestran en la tabla 6-7.

	kV
U max trns A	187.7
U max trns B	187.8
U max trns C	187.7

Tabla 6-7 Tensiones máximas con pérdidas de cortocircuito y corriente arranca 0 A

dan son el valor creta Por tanto el ajuste que se realiza para la corriente arrancada (Imar), es que el valor de esta sea 0.4 A. Obteniendo los resultados mostrados en la 6-19.

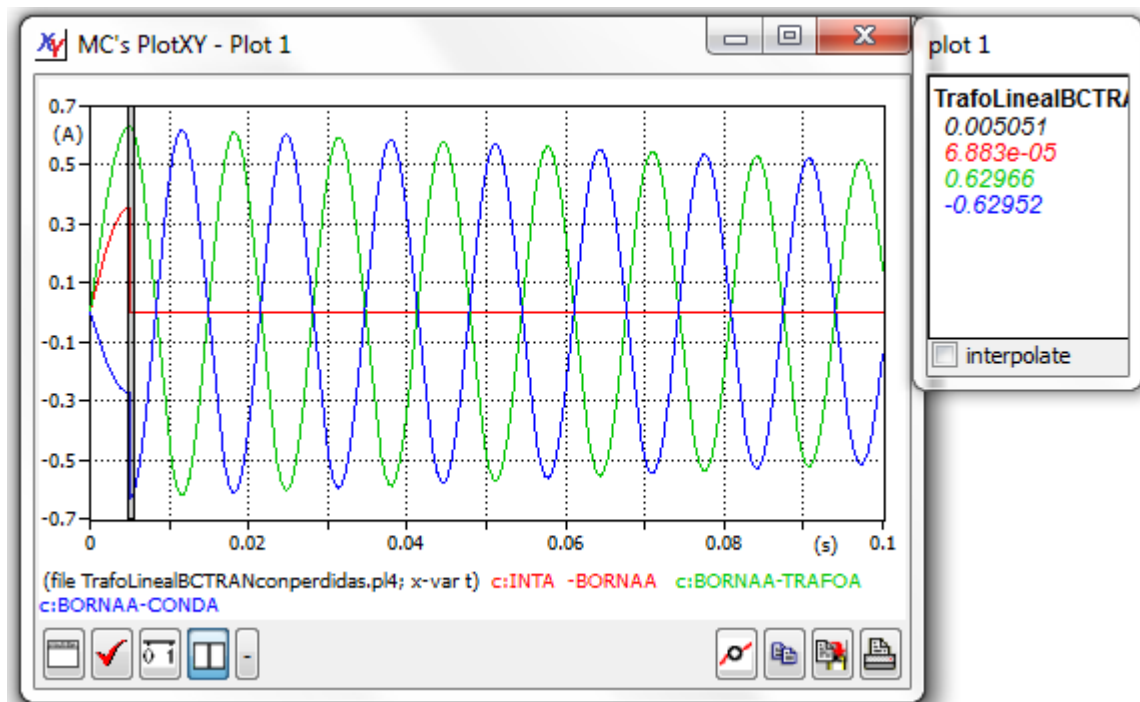


Figura 6-19 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)

Como se puede observar las curvas de la figura 6.19 (considerando sólo las pérdidas en cortocircuito) difieren en gran medida de las de la figura 6.16 (considerando las pérdidas en vacío). Las pérdidas en vacío ayudan a que la corriente se amortigüe en un tiempo muy breve, mientras que las pérdidas en cortocircuito no tienen ese efecto. El motivo es el apuntado en el párrafo precedente (las pérdidas en el cobre dependen de la corriente y en este transitorio la corriente es muy reducida).

Las tensiones para este apartado serían las mostradas en la figura 6-20.

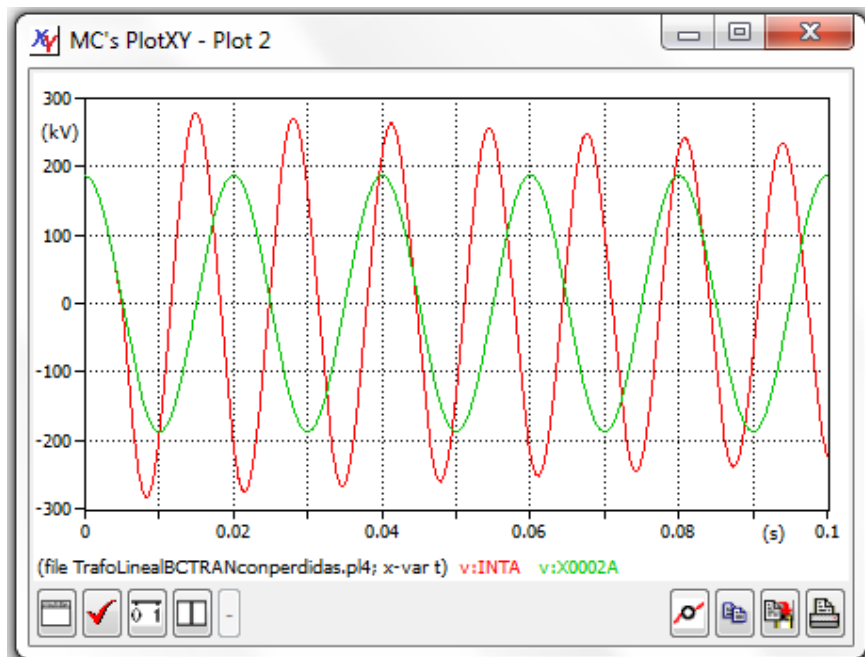


Figura 6-20 Tensión de interruptor (curva roja) & tensión red (curva verde)

Las sobretensiones para esta simulación las mostradas en la tabla 6-8.

	kV
U max trns A	296.4
U max trns B	211.6
U max trns C	214.3

Tabla 6-8 Tensiones máximas con pérdidas de cortocircuito y corriente arranca 0.4 A

6.2.3. Transitorio de desconexión transformador lineal con pérdidas de vacío y de cortocircuito

Este caso no merece ser estudiado, ya que en el apartado 6.2.1. se vio que las pérdidas en vacío por sí mismas son capaces de reducir las sobretensiones a valores no preocupantes.

6.3. Transitorio de desconexión transformador no lineal sin pérdidas

Otro caso de interés, es el estudio del transitorio de desconexión no lineal. Como se hizo estudios anteriores, estudiaremos dos casos, el caso en que se supondrán nulas las pérdidas y el caso en que éstas se tendrán en cuenta.

En este apartado se analiza el efecto de la no linealidad de la curva de magnetización del transformador en la cuantía de las sobretensiones en la desconexión del transformador. El circuito utilizado para este estudio, es el mostrado en la figura 6-28.

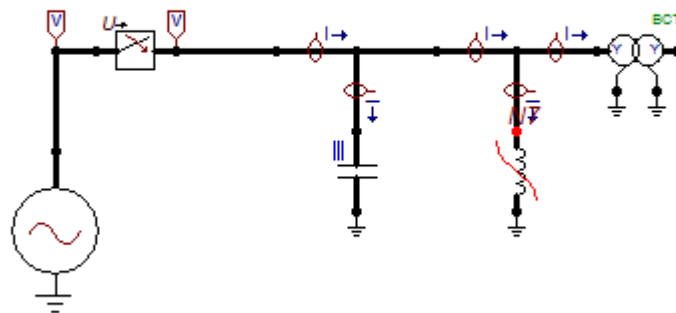


Figura 6-21 Circuito usado para la realización del estudio transformador BTRAN e inductancia variable.

Como se puede observar la diferencia entre los circuitos usados para la simulación, es la introducción de una inductancia variable con la corriente (rama en paralelo con la capacidad parásita).

Para modelar esta inductancia variable, hemos usado en ATPDraw una impedancia variable del tipo "type 93". Para ello hemos introducido en los ajustes de esta impedancia la siguiente tabla, la cual ha sido obtenida de los ensayos realizados al transformador. Esto se muestra en la imagen 6-22.

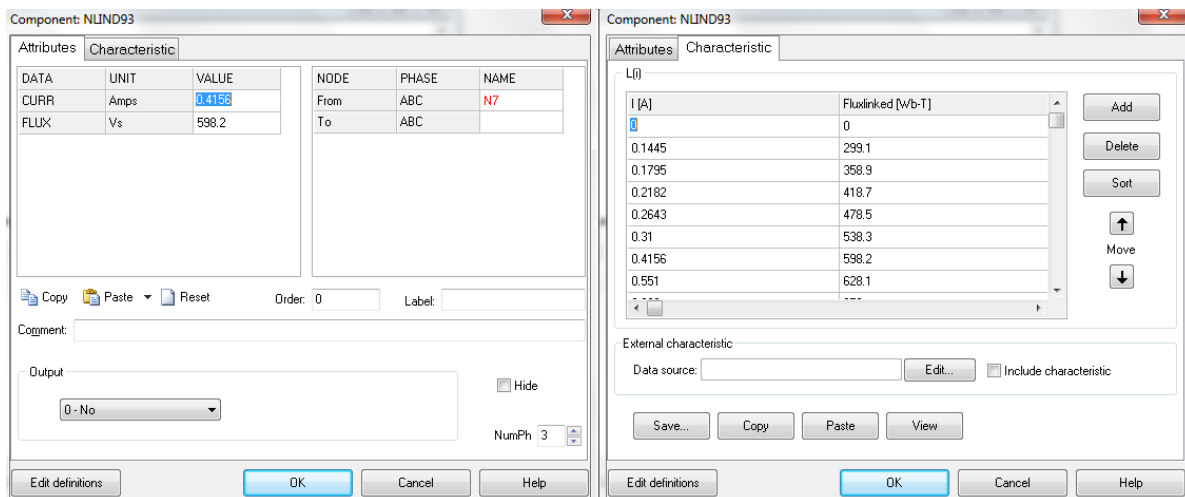


Figura 6-22 Ajuste de la impedancia variable

Seguidamente se han realizados los ajustes oportunos en el transformador, los cuales se muestran en la figura 6-23.

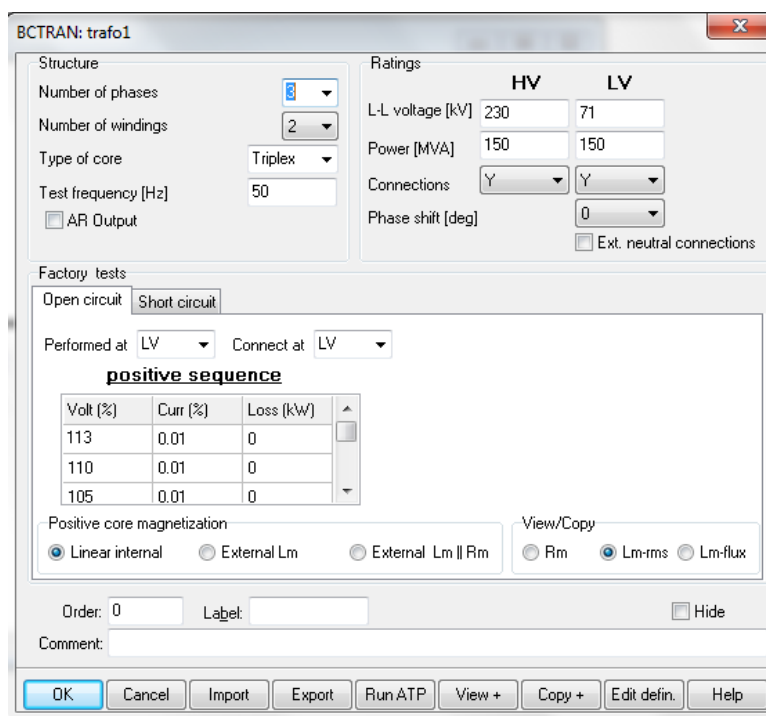


Figura 6-23 Ajuste del transformador

Como se hizo en los anteriores casos hemos procedido a realizar varios ajustes en el interruptor, modificando los valores de la corriente arrancada (Imar). Una vez llevados a cabo todos los ajustes mencionados, y forzando el valor de la corriente arrancada a ser nulo (Imar=0A), mostramos los resultados obtenidos para la primera simulación.

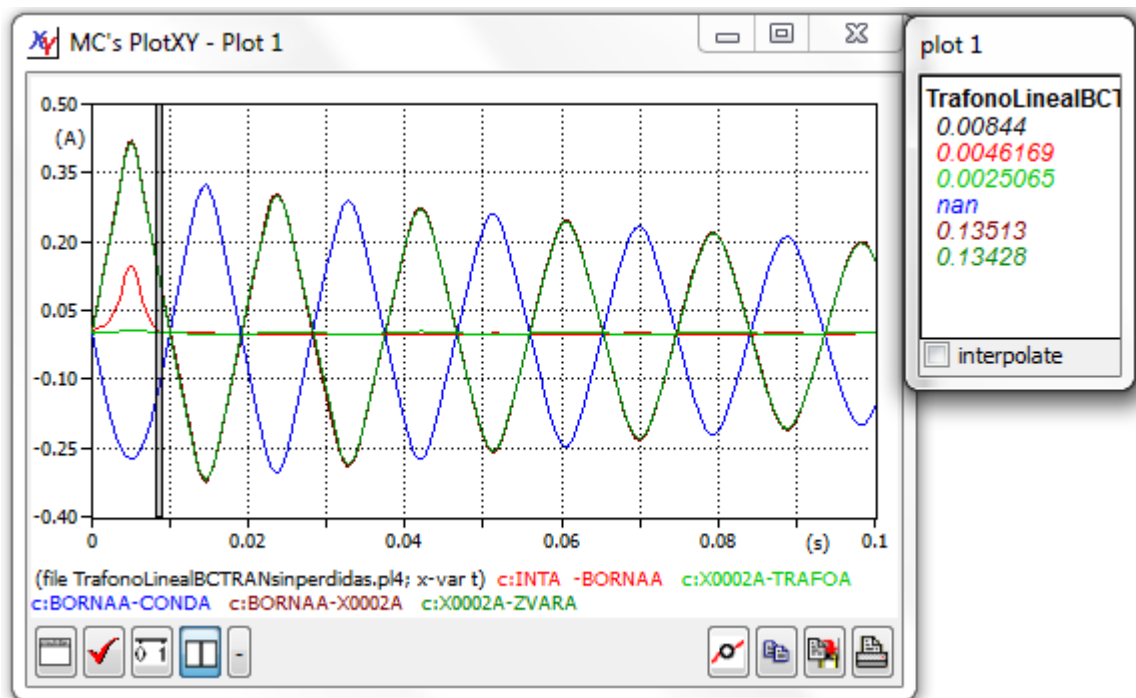


Figura 6-24 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul), corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura)

En la figura 6-24, observamos que como ya sucedía en los casos en que el comportamiento era lineal, la apertura efectiva del circuito no se produce en 5 ms sino que ocurre en el instante de 8 ms. Se puede observar que las ondas se amortiguan ligeramente con el paso del tiempo, lo cual no tiene una explicación sencilla, ya que se han considerado las pérdidas nulas.

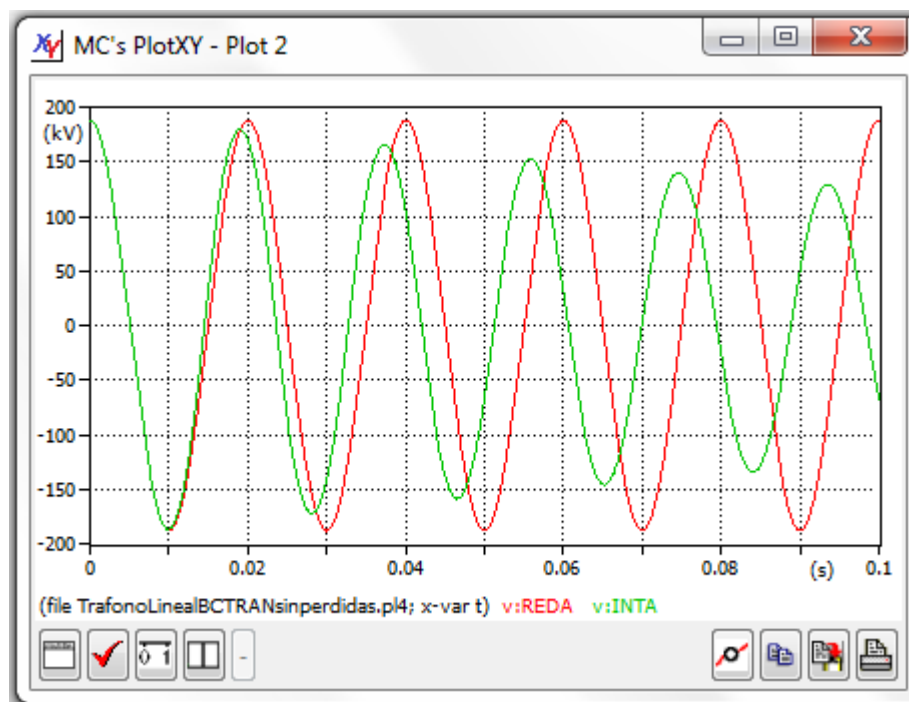


Figura 6-25 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)

En la figura 6.25 se aprecia que a partir de la apertura efectiva del circuito la sinusoide de tensión de red se separa de la tensión en bornes del transformador por efecto de la frecuencia natural del circuito resonante.

A continuación en la tabla 6-8 mostramos las máximas tensiones que se producen para esta simulación.

	kV
U max trns A	179.1
U max trns B	179.4
U max trns C	179.5

Tabla 6-9 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0A

Como se observa en la figura 6-25 y en la tabla 6-8, no se produce ninguna sobretensión, pero nos cabe la duda de que si este fenómeno tampoco se dará en los casos en que el valor de la corriente arrancada (I_{mar}) tenga un valor no nulo.

Apertura con arranque de corriente

Inicialmente tomaremos un valor para la corriente arrancada del interruptor (I_{mar}) de 0,15 A. Realizando los ajustes oportunos en el interruptor como se muestra en la figura 6-26, en la figura 6-27 se muestran los resultados obtenidos.

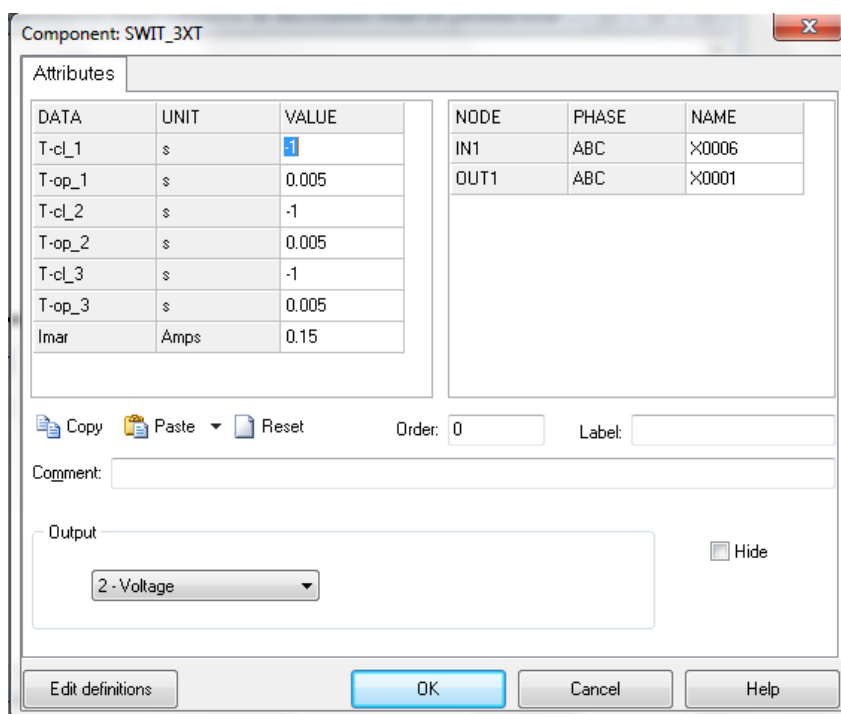


Figura 6-26 Ajuste del interruptor

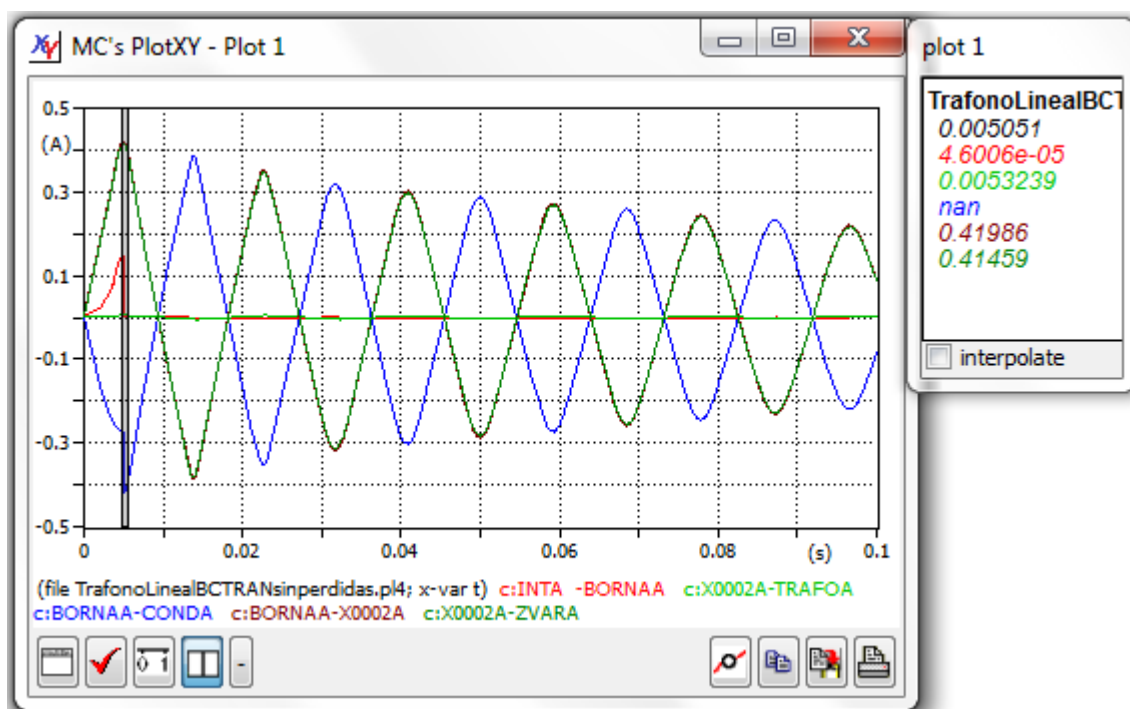


Figura 6-27 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura)

En la figura 6-27 vemos que la apertura del efectiva del circuito ahora sí que se produce en 5 ms, y la corriente por el condensador a partir de este instante tiene el mismo valor que la corriente por la inductancia variable, también aquí se sigue produciendo un amortiguamiento progresivo de las ondas de corriente.

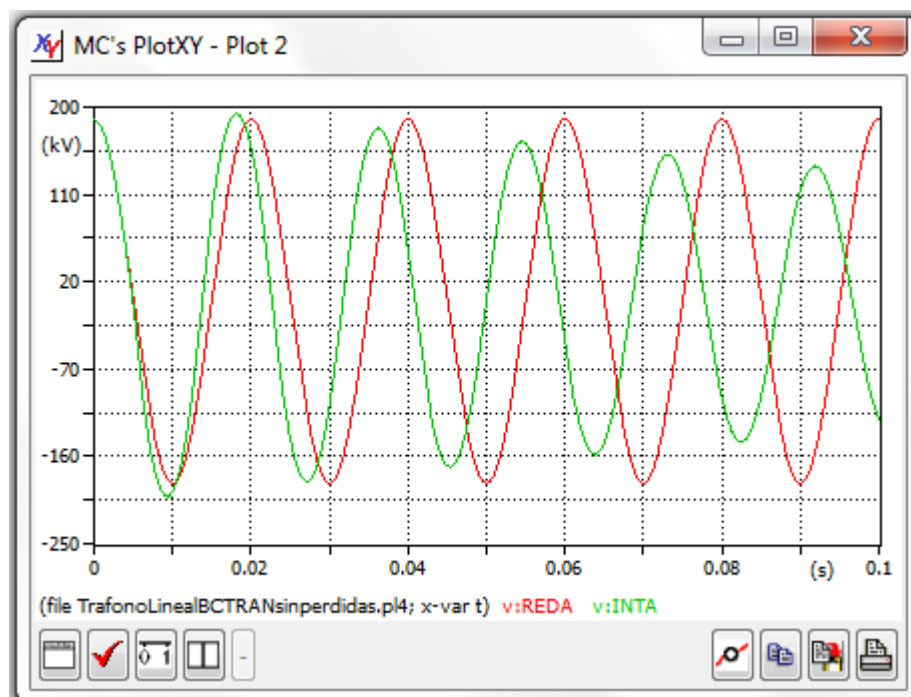


Figura 6-28 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)

En la figura 6-28, se aprecia como hay una ligera sobretensión. Por tanto para este caso se muestran las sobretensiones en la tabla 6-10.

	kV
U max trns A	200.0
U max trns B	177.2
U max trns C	176.1

Tabla 6-10 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0.15 A

Se han realizado simulaciones con diferentes valores de la corriente de arrancada, pero la tensión en bornas del transformador prácticamente no cambia. Así cuando la corriente arrancada es de 0,4 A la tensión máxima transitoria en la fase A sube apenas 1 V, como se muestra en la tabla 6-11.

	kV
U max trns A	201.0
U max trns B	177.2
U max trns C	180.0

Tabla 6-11 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0.4 A

6.4. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas

Como se hizo en apartados anteriores, realizaremos el estudio teniendo en cuenta las pérdidas y la influencia de estas. Los casos de estudio serán los siguientes:

- Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de vacío.
- Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de cortocircuito.
- Transitorio de desconexión transformador no lineal con ambas pérdidas

6.4.1. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de vacío

Analizaremos el peor caso, considerando una corriente arrancada 0,4 A puesto que cuando la corriente arrancada tiene valor nulo, no se produce sobretensiones.

The screenshot shows the 'BCTRAN: trafa12' dialog box with the following settings:

- Structure:**
 - Number of phases: 3
 - Number of windings: 2
 - Type of core: Triplex
 - Test frequency [Hz]: 50
 - ☐ AR Output
- Ratings:**

	HV	LV
L-L voltage [kV]	230	71
Power [MVA]	150	150
Connections	Y	Y
Phase shift [deg]		0
<input type="checkbox"/> Ext. neutral connections		
- Factory tests:**
 - Open circuit: ☐ Short circuit: ☒
 - Performed at: LV Connect at: LV
 - positive sequence**

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
110	0.1634	72.02
105	0.0924	62.89
100	0.059	54.88
 - Positive core magnetization:
 - ☒ Linear internal
 - ☐ External Lm
 - ☐ External Lm || Rm
 - View/Copy:
 - ☐ Rm
 - ☒ Lm-rms
 - ☐ Lm-flux
 - Order: 0 Label:
 - Comment:
 - ☐ Hide

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Import, Export, Run ATP, View +, Copy +, Edit defin., Help.

Figura 6-29 Ajustes del transformador

En la figura 6-30 se muestran los resultados obtenidos para esta simulación.

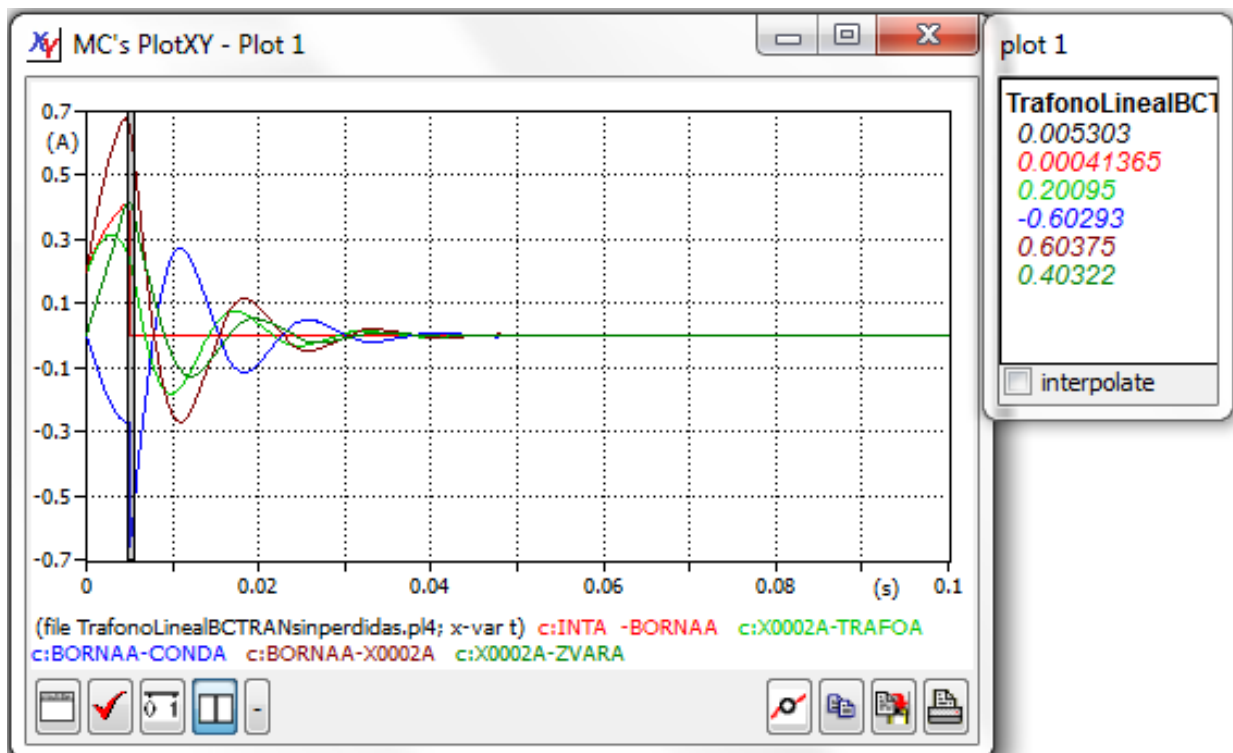


Figura 6-30 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura)

Como se aprecia en la figura anterior la apertura del interruptor sí se produce en el instante de $t=5\text{ms}$. En ese mismo instante la corriente de la capacidad parásita sufre un pico, y se iguala a la forma de onda de la corriente del transformador, de modo que una corriente es la imagen especular de la otra hasta que la onda se extingue. La corriente de la impedancia variable y la corriente magnetizante tienen frecuencias diferentes.

En la figura 6-31, se muestra la comparativa entre la tensión de red con la tensión de la fase A tras la apertura del interruptor, justo en este instante se produce una sobretensión.

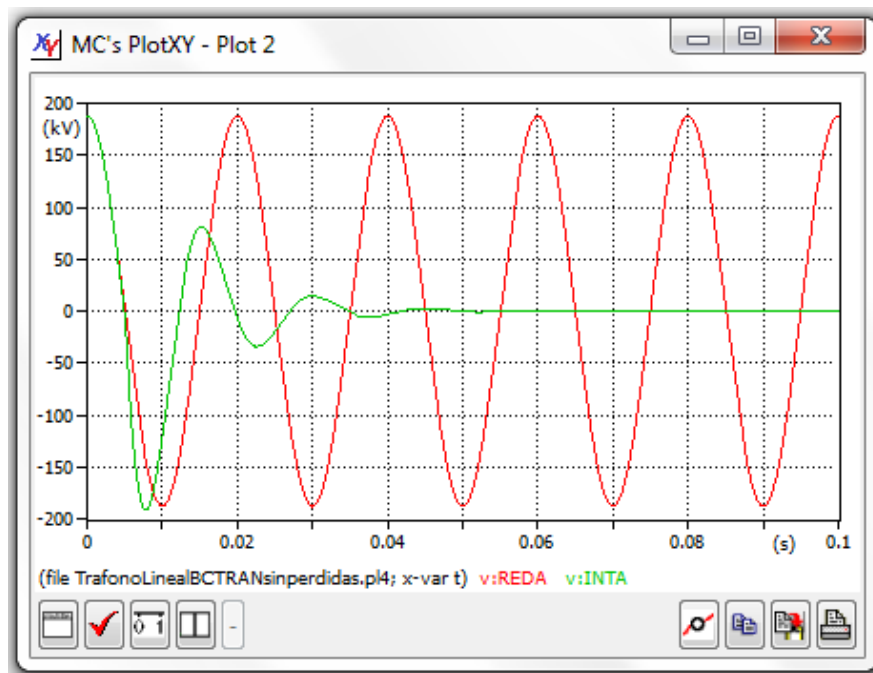


Figura 6-31 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)

Tras ver la sobretensión en la figura 6-31, en la tabla 6-12 se muestra el valor de dicha sobretensión.

	kV
U max trns A	191.1
U max trns B	168.3
U max trns C	134.5

Tabla 6-12 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0.4 A

6.4.2. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de cortocircuito

Para poder realizar este ensayo debemos introducir las pérdidas de cortocircuito en el transformador. El valor de las pérdidas de cortocircuito, se ha obtenido de la hoja de ensayos que me facilitó mi tutor. Todo ello se muestra en la imagen 6-32.

BCTTRAN: trafa1

Structure

Number of phases: 3

Number of windings: 2

Type of core: Triplex

Test frequency [Hz]: 50

☐ AR Output

Ratings

	HV	LV
L-L voltage [kV]	230	71
Power [MVA]	150	150
Connections	Y	Y
Phase shift [deg]		0

☐ Ext. neutral connections

Factory tests

Open circuit Short circuit

positive sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
HV-LV	14.11	150	429.91

Order: 0 Label: ☐ Hide

Comment:

OK Cancel Import Export Run ATP View + Copy + Edit defin. Help

Figura 6-32 Ajuste del transformador.

Tal y como sucediera en el apartado anterior, el ajuste de la corriente arrancada del interruptor será clave para ver las sobretensiones producidas. Se realizó la simulación con un valor de la corriente arrancada nulo ($I_{mar} = 0$ A), pero no se muestran los resultados de esta simulación ya que en este caso no se producían sobretensiones.

Seguidamente se analizó un caso más severo como es el caso con una corriente arrancada de interruptor (I_{mar}) de 0,4 A.

En la figura 6-33, se muestran los resultados de la corriente obtenidos en la simulación.

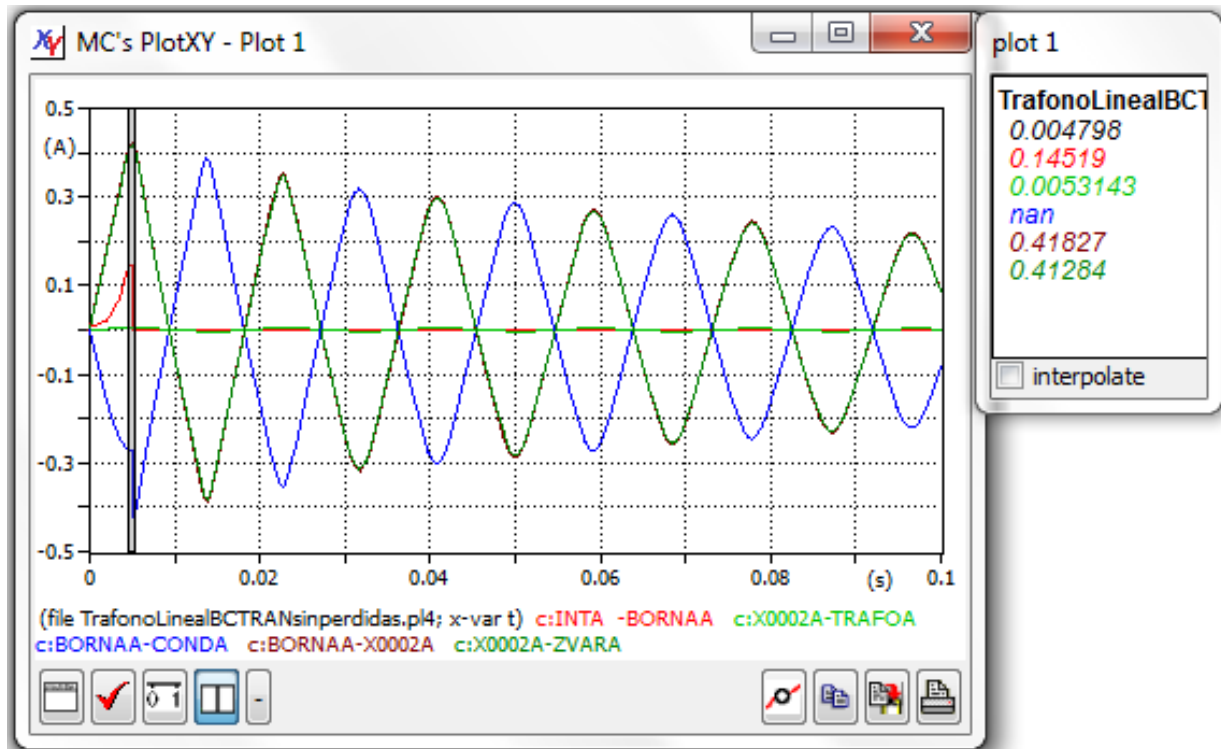


Figura 6-33 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura)

Para esta simulación vemos en la figura 6-33, que la apertura efectiva del circuito se produce en 5 ms. Que en este instante de tiempo la corriente de la capacidad parásita, se vuelve igual y de signo contrario con respecto a la corriente de la inductancia variable. Este fenómeno es debido a que en una inductancia no se puede dar una discontinuidad de la corriente, mientras que en la capacidad parásita la corriente sí que puede ser discontinua, por eso se produce el pico en la onda de la capacidad parasita en el instante de 5 ms.

Vemos que en comparación a las ondas de corriente del caso en que se consideran las pérdidas de vacío a ahora que se consideran las pérdidas de cortocircuito. Las ondas para este último caso tardan mucho más en amortiguarse que el caso anterior.

Una vez que ya hemos analizado la forma de onda de las corrientes, procedemos a ver la forma de onda de las tensiones las cuales se muestran en la figura 6-34.

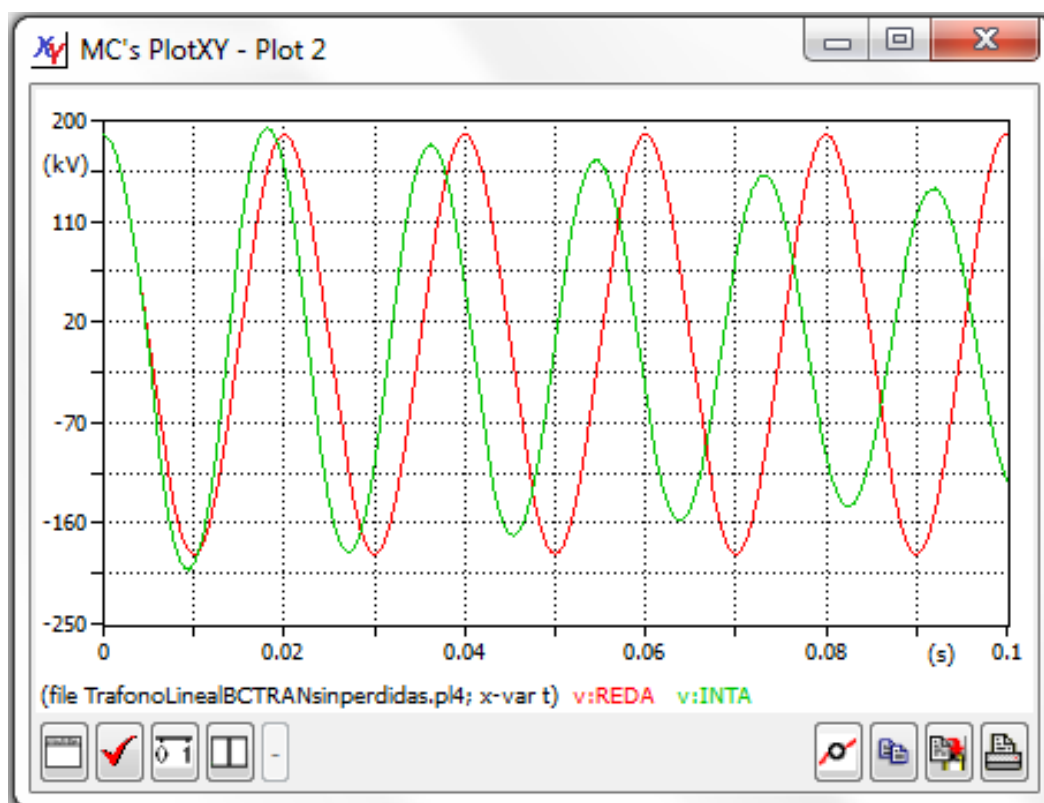


Figura 6-34 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)

Como se aprecia en la figura 6-34, podemos ver que se producen sobretensiones, si bien de un valor muy reducido. El valor de estas sobretensiones se muestra en la tabla 6-12.

	kV
U max trns A	201.2
U max trns B	179.6
U max trns C	184.3

Tabla 6-13 Tensiones máximas para el caso en que el transformador pérdidas de cortocircuito es no lineal y corriente arrancada 0.4 A

6.4.3. Transitorio de desconexión transformador no lineal con pérdidas de vacío y de cortocircuito.

Este caso también se ha analizado en el TFG, si bien no se muestran las formas de onda obtenidas porque aportan poco respecto a las formas de onda ya mostradas. La influencia preponderante es la de las pérdidas en vacío.

El valor de las tensiones en bornas del transformador se muestra en la tabla 6-13. Como se puede observar dicha tabla se produce una ligera sobretensión en la primera fase que abre (el valor de cresta de la tensión de red es 187,8 kV).

	kV
U max trns A	191.2
U max trns B	168.3
U max trns C	134.1

Tabla 6-14 Tensiones máximas para el caso en que el transformador tiene ambas pérdidas, es no lineal y corriente arrancada 0.4 A

6.5. Conclusiones

En este apartado se realiza un resumen de los resultados obtenidos al simular el transitorio de desconexión de un transformador trifásico en vacío en todos los casos vistos en este capítulo, de forma que se pueda hacer una comparación de forma rápida. Dependiendo de los casos de estudio hemos obtenidos los siguientes resultados.

Para interpretar las tablas que siguen debe tenerse en cuenta que el valor de cresta de la tensión de fase en el transformador cuando no hay sobretensiones es:

$$U_{max} = \frac{230}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = 187,794 \text{ kV}$$

6.5.1. Caso lineal

Las siguientes tablas muestran los valores máximos y mínimos de tensión en el caso de que el comportamiento del transformador se considere lineal, y no se tengan en cuenta las pérdidas. La figura 6-35 muestra las formas de onda en este caso.

COMPARATIVA I			
Corriente Arranca 0,4 A		Corriente Arranca 0 A	
U max trns A	275.110 V	U max trns A	187.794 V
U max trns B	208.073 V	U max trns B	187.794 V
U max trns C	214.866 V	U max trns C	187.794 V

Tabla 6-15 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador BCTRAN en el caso lineal sin pérdidas.

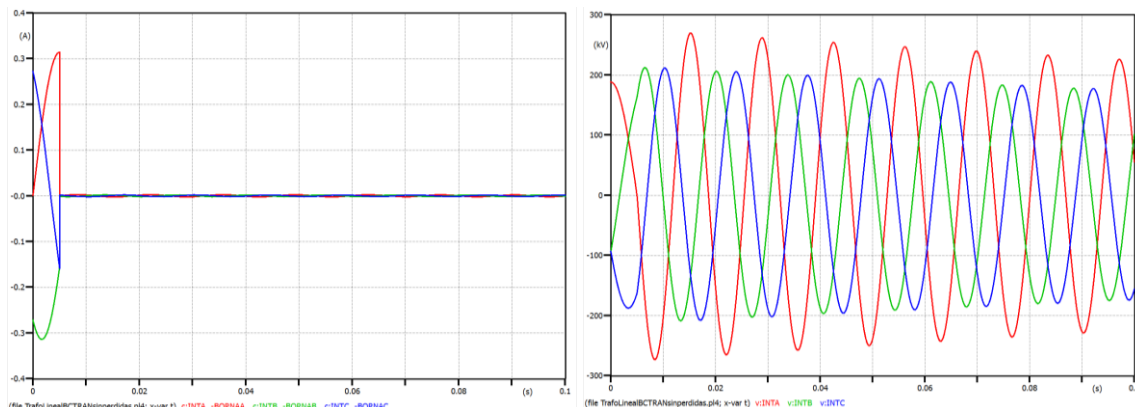


Figura 6-35 Intensidades (curvas de la izquierda) y tensiones (curvas de la derecha) en el caso lineal sin pérdidas y con corriente arrancada 0,4 A.

Como se observa en la tabla 6-14 los valores máximos de sobretensión se dan cuando la corriente arrancada del interruptor (I_{mar}) tiene un valor de 0,4 A. Por el contrario cuando la corriente arrancada es 0 A no se producen sobretensiones en el circuito analizado.

Para el comportamiento lineal con pérdidas, aquí se han comparado todos los valores de las sobretensiones independiente de sí se han considerado las pérdidas de vacío, de cortocircuito o de ambas pérdidas, y el valor de la corriente arrancada 0 A

COMPARATIVA II					
Pérdidas de vacío		Pérdidas de cortocircuito		Ambas pérdidas	
U max trns A	174.003 V	U max trns A	187.722 V	U max trns A	171.740 V
U max trns B	172.711 V	U max trns B	187.827 V	U max trns B	171.350 V
U max trns C	171.631 V	U max trns C	187.722 V	U max trns C	171.930 V

Tabla 6-16 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador BCTRAN en el caso lineal considerando pérdidas con 0 A de corriente arrancada

El resultado que arroja esta comparativa II (tabla 6-15) es que las tensiones más elevadas cuando la corriente arrancada tiene un valor nulo, se producen para el caso en que solo se tienen en cuenta las pérdidas corto circuito. No obstante cuando la corriente arrancada es nula el valor de las tensiones obtenidas coinciden con valor de cresta de la tensión de fase en el transformador antes de la apertura del interruptor.

Por el contrario, los valores mínimos de tensión se producen cuando en la simulación se introducen los valores de ambas pérdidas.

En este caso, como en el caso precedente no hay sobretensiones si la corriente arrancada es nula. La existencia de pérdidas amortigua rápidamente el transitorio resonante entre la capacidad parásita del transformador y la inductancia magnetizante.

Para el caso de considerar el transformador lineal con pérdidas y con una corriente arrancada a 0.4 A se obtienen los resultados mostrados en la tabla 6-16.

COMPARATIVA III					
Pérdidas de vacío		Pérdidas de cortocircuito		Ambas pérdidas	
U max trns A	196.981 V	U max trns A	296.441 V	U max trns A	198.700 V
U max trns B	171.790 V	U max trns B	211.580 V	U max trns B	169.480 V
U max trns C	141.940 V	U max trns C	214.300 V	U max trns C	140.210 V

Tabla 6-17 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador BCTAN en el caso lineal con 0,4 A de corriente arrancada considerando diferentes tipos de pérdidas.

El resultado mostrado en la tabla 6-16, se ve como las sobretensiones más severas se dan en el caso en que se consideren solo las pérdidas de cortocircuito. Por el contrario en el caso en que solo se consideran las pérdidas de vacío las sobretensiones en bornas del transformador son muy reducidas. Ello es debido a que las pérdidas en el cobre del transformador dependen de la corriente y en vacío la corriente es muy reducida.

En este caso las sobretensiones considerando ambas pérdidas son ligeramente mayores que considerando sólo las pérdidas de vacío, pero ello debe ser debido a pequeñas diferencias entre ambas simulaciones.

6.5.2. Caso no lineal

Considerando el comportamiento no lineal del transformador, haremos los mismos estudios que el caso lineal.

Para el caso no lineal en que las pérdidas son nulas. Obtenemos la tabla 6-18.

COMPARATIVA IV			
Corriente arrancada 0,4 A		Corriente arrancada 0 A	
U max trns A	201.020 V	U max trns A	179.060 V
U max trns B	177.202 V	U max trns B	179.440 V
U max trns C	180.005 V	U max trns C	179.490 V

Tabla 6-18 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador en el caso no lineal sin pérdidas

Las conclusiones obtenidas para la tabla 6-18, vemos que los máximos de tensión se dan en el caso en que la corriente arrancada por el interruptor es 0,4 A y los mínimos que aparecen en la tabla se dan en el caso en el que la corriente arrancada tiene valor nulo.

Comparando las tablas 6-14 y 6-18 vemos que la no linealidad del transformador reduce el valor de las sobretensiones en bornas del mismo. Este resultado es debido a que al entrar en saturación la relación entre el flujo y la corriente deja de ser lineal, de tal forma que una determinada corriente crea menos flujo si la máquina se satura del que crearía si la máquina no se saturase. Con ello la tensión en bornas en la capacidad parásita del transformador es menor.

Para el caso no lineal con pérdidas y corriente arrancada 0 A, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6-19.

COMPARATIVA V					
Pérdidas de vacío		Pérdidas de cortocircuito		Ambas pérdidas	
U max trans A	166.190 V	U max trans A	179.060 V	U max trans A	166.840 V
U max trans B	166.560 V	U max trans B	179.440 V	U max trans B	166.660 V
U max trans C	166.770 V	U max trans C	178.840 V	U max trans C	166.770 V

Tabla 6-19 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador en el caso no lineal con 0 A de corriente arrancada y considerando diferentes tipos de pérdidas.

Observando la tabla vemos que cuando se consideran las pérdidas no se producen sobretensiones. De nuevo aquí, al comparar las tablas 6-15 y 6-19, vemos que la saturación del transformador se traduce en unas menores tensiones en bornas.

Para el caso no lineal con pérdidas y corriente arrancada 0,4 A, se muestran los resultados en la tabla 6-20.

COMPARATIVA VI					
Pérdidas de vacío		Pérdidas de cortocircuito		Ambas pérdidas	
U max trans A	191.160 V	U max trans A	201.250 V	U max trans A	191.160 V
U max trans B	168.310 V	U max trans B	179.610 V	U max trans B	168.310 V
U max trans C	134.580 V	U max trans C	184.340 V	U max trans C	134.110 V

Tabla 6-20 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador en el caso no lineal con 0,4 A de corriente arrancada y considerando diferentes tipos de pérdidas.

Observando los resultados de la tabla 6-20, vemos que la conjunción de la no linealidad con la existencia de pérdidas reduce las sobretensiones a valores muy reducidos que no son de consideración.

6.6. Efecto del terciario

A lo largo de este capítulo se ha considerado que el transformador en estudio es un transformador Yy. Los transformadores Yy son conceptualmente más sencillos de estudiar pero son muy poco utilizados en las redes eléctricas, mucho más utilizados son los transformadores Yyd. Aunque no entra dentro de los objetivos del Trabajo Fin de Grado un estudio en profundidad del transitorio de desconexión de los transformadores Yyd, en este apartado del capítulo 6, tiene como finalidad mostrar de forma somera el efecto que tiene el devanado terciario en los transformadores trifásicos. En el capítulo 5, en la tabla 5-1 se mostraron los datos del transformador con el que realizaríamos este Trabajo Fin de Grado.

Para realizar este caso de estudio haremos dos simulaciones con el modelo BCTRAN. Las simulaciones son las siguientes:

- Transitorio de desconexión del transformador BCTRAN con terciario aislado
- Transitorio de desconexión del transformador BCTRAN con terciario PAT

Los ajustes que se han llevado a cabo para realizar las siguientes simulaciones se muestran en la figura 6-36.

BCTran: trafo

Structure

Number of phases: 3

Number of windings: 3

Type of core: Triplex

Test frequency [Hz]: 50

☐ AR Output

Ratings

	HV	LV	TV
L-L voltage [kV]	230	71	20
Power [MVA]	150	150	50
Connections	Y	Y	D
Phase shift [deg]		0	330

☐ Ext. neutral connections

Factory tests

Open circuit: ☐ Short circuit: ☒

Performed at: HV Connect at: HV

positive sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
100	0.059	0.01

Positive core magnetization

☒ Linear internal ☐ External Lm ☐ External Lm || Rm

View/Copy

☐ Rm ☒ Lm-rms ☐ Lm-flux

Order: 0 Label:

☐ Hide

Comment:

OK Cancel Import Export Run ATP View + Copy + Edit defin. Help

Figura 6-366 Ajustes del transformador

En la figura 6-37 se muestra el circuito usado para simular el transitorio de desconexión del transformador BCTran con terciario aislado.

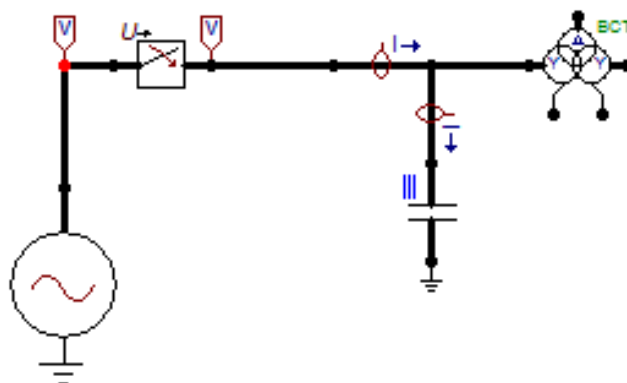


Figura 6-377 Circuito analizado

Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la figura 6-38. Como se puede ver tras la apertura efectiva del interruptor, que se da cuando la fase B pasa por cero, las corrientes de la fase A y de la fase C son la imagen especular una de la otra. Esto es debido a que dado que el neutro está aislado la suma de las corrientes en el punto neutro es nula, y al quedar la máquina a dos fases las corrientes por ambas han de ser iguales y de signo opuesto. La forma de onda de las corrientes es muy semejantes a las que se tienen en un transformador de dos arrollamientos en este caso (figura 4-15).

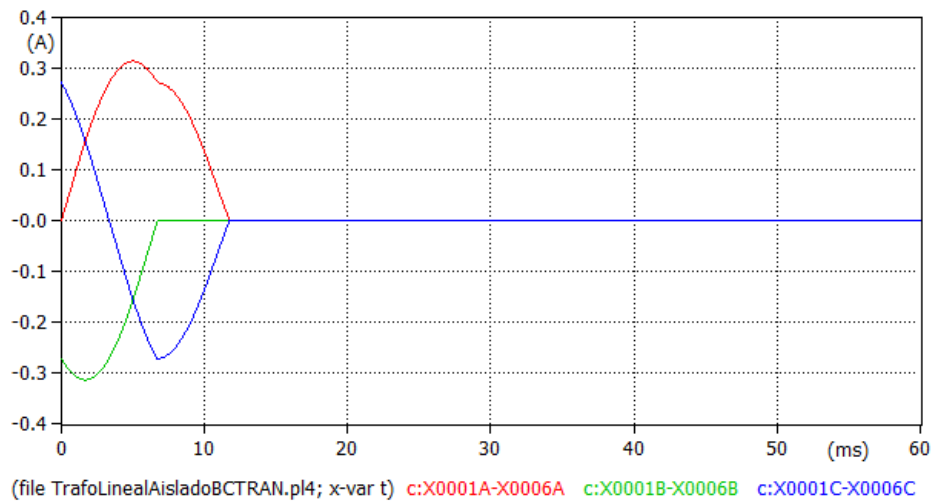


Figura 6-388 Corriente de vacío del transformador con tres arrollamientos con el neutro aislado. Caso lineal. Curva
 Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.

A continuación en la figura 6-39 se muestra las sobretensiones que se dan en el sistema cuando tenemos un devanado terciario.

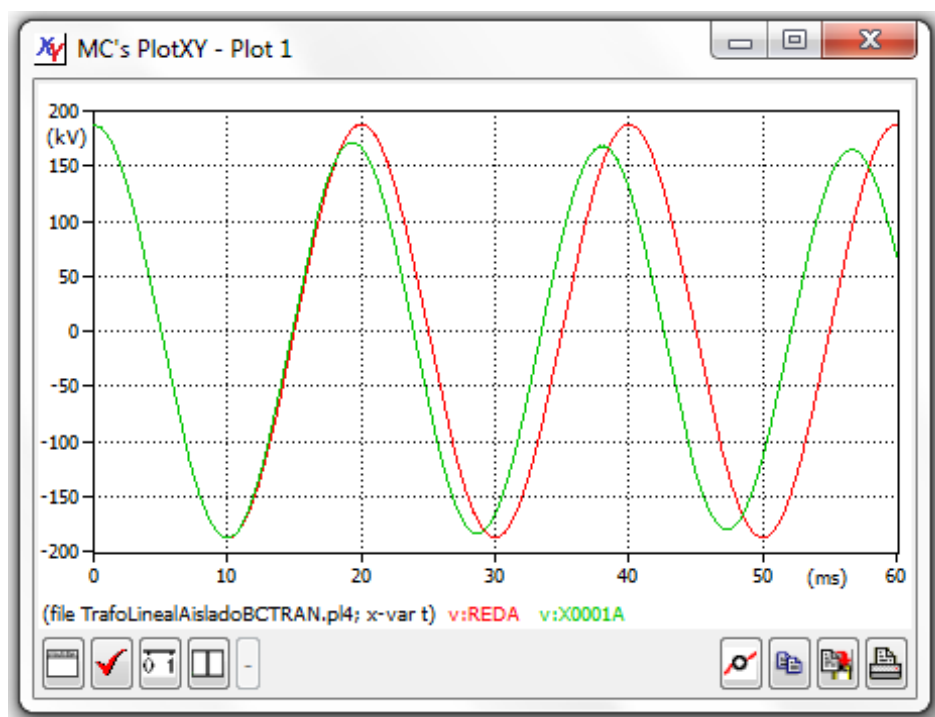


Figura 6-399 Tensión de red en fase A (Curva roja) & Tensión interruptor fase A (curva verde)

	V
U max trns A	184.970
U max trns B	197.040
U max trns C	198.750

Tabla 6-21 Sobretensiones BCTRAN Yyd neutro aislado

En la tabla 6-21, se muestran las tensiones máximas que se han obtenido para este caso. Se observa que en la fase A, la tensión queda próxima al valor de cresta de la tensión de fase en el transformador, pero no llega al valor máximo. Sin embargo en las fases restantes B y C sí que se producen sobretensiones, pero viendo los valores observamos que el valor de estas es muy pequeño con respecto a los casos que estudiamos anteriormente esto es debido a que en esta simulación se ha introducido un valor muy pequeño de pérdidas de vacío, las pérdidas de corto se suponen nulas y a que el valor de corriente arrancada es nulo.

En la figura 6-40 se muestra el circuito usado para realizar el transitorio de desconexión del transformador BCTAN con terciario puesto a tierra.

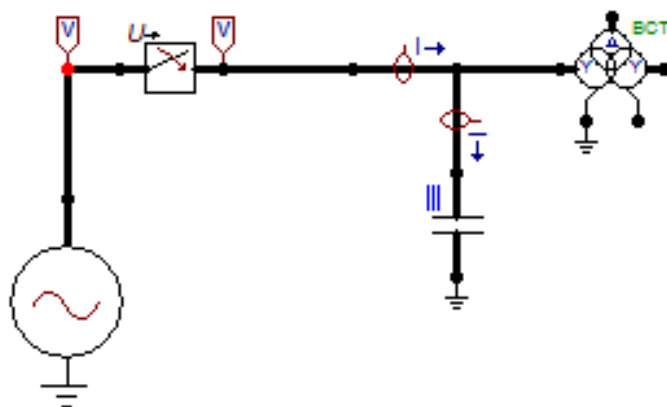


Figura 6-4040 Circuito analizado

Para este caso, los resultados obtenidos se muestran en la imagen 6-41.

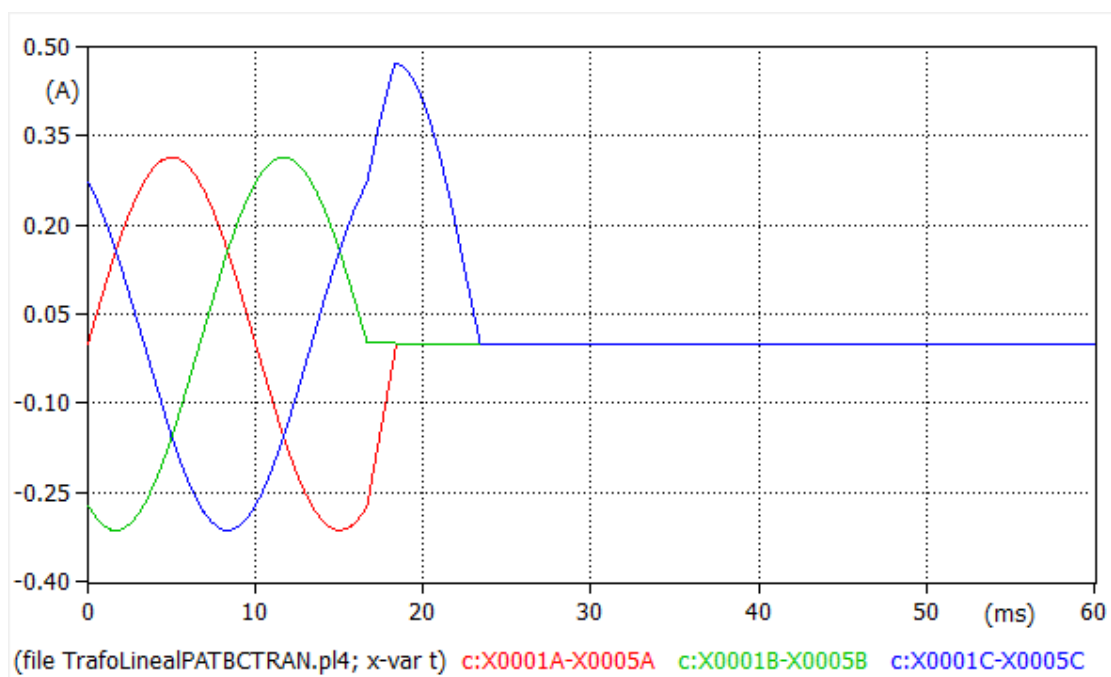


Figura 6-41 Corriente de vacío del transformador con tres arrollamientos con PAT. Caso lineal. Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.

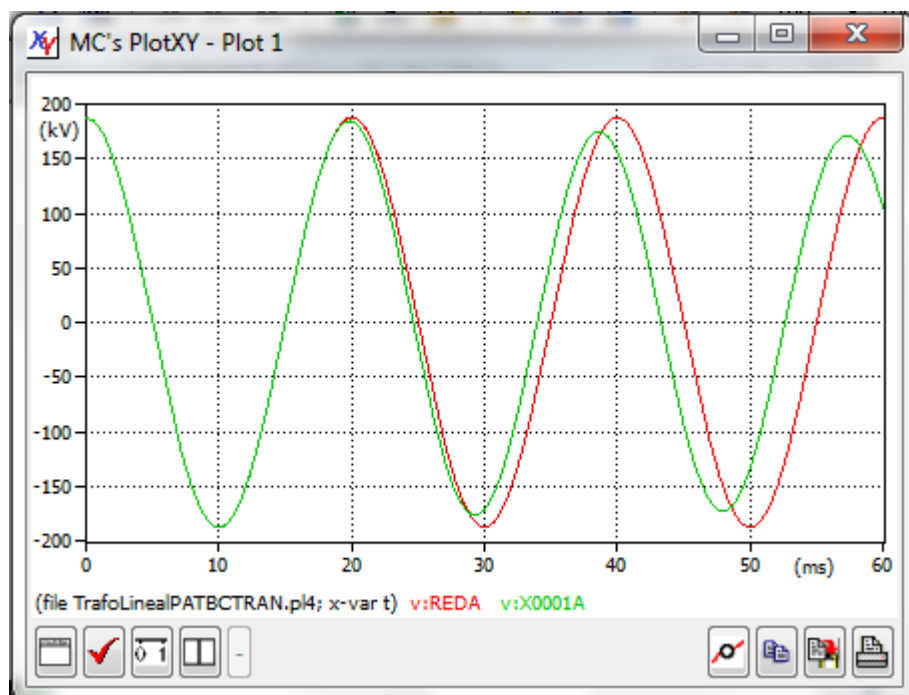


Figura 6-412 Tensión de red en fase A (Curva roja) & Tensión interruptor fase A (curva verde)

	V
U max trns A	182.940
U max trns B	195.140
U max trns C	185.770

Tabla 6-22 Sobretensiones BCTTRAN Yyd puesto a tierra

Para este caso, las tensiones máximas que se alcanzan en este caso, se muestran en la tabla 6-22. Si nos fijamos en los valores de tensiones máximas observamos que en dos fases no se produce sobretensión, (fase A y fase C) y en la restante si se produce una sobretensión. Si comparamos con otros casos de estudio anteriores vemos que la cuantía de las sobretensiones no es muy elevada. Esto es debido a que para este caso tampoco se ha introducido un valor de corriente arrancada diferente de cero y que se han supuesto que las pérdidas de vacío son muy pequeñas y las pérdidas de cortocircuito son nulas.

En el caso de un transformador de dos arrollamientos, al existir neutro de retorno los transformadores del banco de transformación actúan de forma independiente. Eso hacía que cuando se abre una determinada fase (por ejemplo la fase B) las corrientes en las otras dos fases no se vean afectadas por ello y continúan siendo dos sinusoides idénticas y decaladas 120 °C (figura 4-12). Sin embargo, la existencia de un arrollamiento terciario que interconecta los tres transformadores hace que al extinguirse la corriente en una de las fases (por ejemplo la fase B) las corrientes en las otras dos fases ya no sean idénticas a las que se tenían antes de abrir. En este sentido, el transformador que ha abierto se comporta como un transformador alimentado por su terciario (a partir de los otros dos transformadores que siguen funcionando) y cuyo primerio está cargado con una capacidad (la propia capacidad parásita de los arrollamientos).

En la figura 6-41 la primera corriente en extinguirse es la corriente por la fase B (curva verde) y a partir de ese momento la corriente en la fase C (curva azul) comienza a crecer alcanzándose valores de cresta de la corriente bastante más altos de los que se tenían en régimen permanente. Un análisis en profundidad de los fenómenos que dan lugar a esos resultados requeriría de un tiempo del que no se dispone en un trabajo fin de grado.

CAPITULO 7: RESUMEN Y CONCLUSIONES

A lo largo del capítulo 7 se hará un resumen de todos los pasos realizados desde que se comenzará con la realización de este proyecto haya por el mes de Enero hasta este último mes de junio.

7.1. Resumen del trabajo realizado

El llevar a cabo este trabajo fin de grado, ha sido todo un reto para mi persona, pues al combinar trabajo y estudio ha sido duro. Este proyecto me ha requerido mucho esfuerzo que se ve convertido en estas páginas escritas, han sido varias las dificultades que se me han presentado en el camino, entre ellas entender el programa que he tenido que usar, para llevar a cabo las simulaciones pertinentes para cada caso de estudio. Además los fenómenos que tienen lugar durante la desconexión del transformador son fenómenos complejos y su interpretación requiere de una gran comprensión de la teoría de circuitos y del funcionamiento del transformador. Las simulaciones realizadas me han ayudado a la comprensión del transitorio de desconexión del transformador.

Ha habido varias decisiones que han sido claves en el rumbo que ha tomado esta memoria, como por ejemplo la que tuve que tomar en el capítulo 4, con la elección del modelo, pues desde un primer momento pensé que el modelo correcto para realizar las simulaciones sería el modelo XFMR, el cual nos permitía ajustar la curva de magnetización del transformador. Finalmente y tras realizar varias simulaciones las cuales se muestran en el capítulo anteriormente indicado, observamos que el mejor modelo para realizar el estudio llevado a cabo era el modelo BCTRAN.

Otro aspecto que ha marcado este proyecto ha sido la influencia de los siguientes fenómenos:

- La influencia de la puesta a tierra en el neutro del transformador tras la apertura del interruptor, aquí pudimos observar el fenómeno de retorno de las corrientes por las fases. El hecho de que tuvieramos el neutro puesto a tierra (PAT) proporcionaba a las corrientes un camino de retorno, haciendo que el paso por cero de estas se produjera en instantes diferentes de tiempo. Este fenomeno no se producía cuando teníamos el neutro aislado. Puesto que tras la apertura efectiva del interruptor, la primera corriente se extinguía y las otras dos, se convertían en la imagen especular una de otra hasta que finalmente ambas se extinguían en el mismo instante.
- La influencia de las capacidades, fenómeno que a priori, podríamos intuir que apenas proporcionaría valor a la simulación, pues al poseer un valor tan pequeño no influirían. Para nuestra sorpresa ha sido todo lo contrario. El hecho de que modificar estas capacidades nos ha hecho ver como se modifican las corrientes de vacío. Todo ello se ha mostrado en la tabla 4-3.

Otro fenómeno que observamos en este tipo de simulaciones fue la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR), este concepto hace referencia a la tensión que hay entre los polos cuando se produce la apertura del interruptor después de la extinción de la corriente.

Una vez que se vio cual el mejor modelo para continuar con el estudio, se procedió a dar un paso más, este paso consistía en llevar a cabo la simplificación del circuito eléctrico equivalente del transformador. Para poder realizar esta simplificación tuvimos que recurrir a las transformaciones de Kennelly, las cuales nos servían para pasar las capacidades parasitas del transformador de triangulo a estrella. Las capacidades se obtuvieron de los ensayos proporcionados por mi tutor, estas capacidades se muestran en la tabla 5-2. Con este paso conseguíamos tener todo nuestro circuito en estrella y podríamos recurrir a la asociación de impedancias en paralelo y serie, con el objetivo de obtener el valor de la corriente magnetizante. El valor de la corriente se calculó en la ecuación 28. Estos datos eran necesarios para que las simulaciones del siguiente capítulo tuvieran sentido. Un resultado erróneo hubiera dado lugar a rehacer cálculos o que este trabajo no tuviera ningún valor sobre la realidad.

Los valores obtenidos en el capítulo 5, aparte de ser la base para las simulaciones llevadas a cabo en el capítulo 6, como ya se comentó en líneas anteriores, nos servirían para tener en cuenta los valores de la corriente arrancada del interruptor (I_{mar}). Con estos valores de corriente, mostrados en la tabla 6-1, podríamos ver cuando sería el peor caso de apertura del interruptor, lo que llevaría a que las sobretensiones fueran más severas y por tanto llevar al transformador a un estado limite.

Una vez completado el capítulo 5, se procedió a analizar el transitorio de desconexión del transformador. En este capítulo se abordó el estudio con diferentes grados de simplificación:

- Comportamiento lineal del transformador:
- Comportamiento no lineal del transformador

A todo lo comentado anteriormente, añadimos la modificación de la corriente arrancada del interruptor, la cual varía en un rango de 0 A hasta 0,4 A.

Comportamiento lineal del transformador

Este comportamiento del transformador viene dado porque se hace la suposición de que la curva de magnetización es lineal y por tanto para llevar a cabo las simulaciones de este estudio, en los ajustes del transformador, introduciríamos un solo punto de la curva de magnetización. La curva de magnetización fue obtenida de los ensayos a los que se sometió el transformador. El punto escogido de la curva es el coincidía con el 100% de la tensión y con esto obtendríamos el efecto deseado del comportamiento lineal.

Para llevar a cabo este estudio se utilizó el circuito eléctrico mostrado en la figura 6-1.

En este caso se pueden tener sobretensiones del orden de un 45% en alguna de las fases del transformador en el peor de los casos (que el corte de la corriente se produzca en un paso por máximo de la onda de corriente).

Comportamiento no lineal del transformador

Al contrario que el caso anterior, este comportamiento del transformador, viene dado porque se realiza la suposición de que la curva de magnetización no es lineal. Para ello en los ajustes del transformador introduciríamos los valores obtenidos de los ensayos.

A parte de esta modificación con respecto al comportamiento anterior, en el circuito usado para llevar a cabo este estudio hemos tenido que añadir una inductancia variable con la corriente, la cual nos proporcionaría el efecto del comportamiento no lineal en el transformador. Los valores que introducidos en los ajustes de esta inductancia variable son los obtenidos en los ensayos de los transformadores.

En este caso las sobretensiones son menores que en el caso precedente y apenas alcanzan el 7% en el peor de los casos (que el corte de la corriente se produzca en un paso por máximo de la onda de corriente).

Una vez definida la estructura a seguir en el planteamiento del capítulo 6, se realizaron varios subapartados, en los cuales se mostrada el transitorio de desconexión teniendo en cuenta que los siguientes hechos referentes a las pérdidas:

- Se supuso que las pérdidas del transformador, tenían con un valor nulo.
- Se supuso que el valor de las pérdidas no eran nulo y las distinguíamos en tres posibles casos:
 - ❖ Solo existían las pérdidas vacío
 - ❖ Solo existieran las pérdidas de cortocircuito
 - ❖ Que se dieran las dos pérdidas.

La existencia de pérdidas en el hierro reduce las sobretensiones de forma muy importante. Por el contrario las pérdidas en el cobre apenas las reduce, como era de esperar.

El estudio realizado sobre las sobretensiones que se producen en los transformadores trifásicos no sólo permite cuantificar el valor de las sobretensiones sino que son una herramienta muy útil como ayuda a la comprensión del transitorio de desconexión del transformador.

Hemos observado detalles cuya comprensión hubieran sido muy difícil por otros medios. Algunos de estos detalles son los siguientes:

- El significado preciso del factor del primer polo, que se da sólo en el primer máximo de la TTR pero no en los siguientes.
- La discontinuidad de la corriente en las capacidades parásitas, tras la apertura efectiva del interruptor. Este fenómeno se puede observar en todos los casos

simulados siendo más claro cuando el valor de la corriente arrancada del interruptor (I_{mar}) tiene el valor superior del rango comentado en líneas anteriores. Esta discontinuidad de la corriente se produce porque no se puede dar la discontinuidad de corriente tras la apertura efectiva del interruptor en la bobina.

- El efecto de la frecuencia natural, el cual se aprecia en las simulaciones en las que se ven las tensiones. Puesto que en el instante que se produce la apertura efectiva del interruptor, la tensión en el polo 2 (Cerca del transformador) oscila a la frecuencia natural del circuito la cual se calculó en la ecuación 30.
- El valor de las sobretensiones es superior cuando el valor de la corriente arrancada del interruptor (I_{mar}) tiene el valor de pico de la corriente magnetizante es decir, el valor de pico de la corriente magnetizante tiene el valor de 0.4 A.
- El valor de las sobretensiones varía en función las pérdidas como se comentó en las conclusiones del capítulo 5, y en función del comportamiento lineal o no lineal.
- Cuando se tiene en cuenta las pérdidas, las ondas de corriente se amortiguan con el paso de tiempo.

Para finalizar este trabajo fin de grado, se hizo un pequeño estudio el cual consiste en ver el efecto de introducir un devanado terciario en el transformador. Para este caso al ser muy complejo solo realizamos dos simulaciones en las que se aprecia muy bien el efecto citado en líneas anteriores.

7.2. Conclusiones

Antes de indicar las conclusiones del trabajo realizado conviene recordar primero los objetivos propuestos en un principio, los cuales se vuelven a citar:

- Saber cuál es el mejor modelo de transformador para el estudio en transformadores trifásicos.
- Estudiar las sobretensiones en transformadores trifásicos, que se obtienen al producirse la desconexión de la red.
- Comprender con precisión los problemas y consecuencias que pueden ocasionar las aperturas de interruptores del sistema, cuando el interruptor produce un arranque de corriente en el transformador.
- Entender el efecto que tienen las pérdidas, tanto de vacío como de cortocircuito, en el valor de las sobretensiones que se producen durante la desconexión del transformador de la red.

En relación al primer objetivo, aun teniendo en cuenta las mejoras que se han realizado en el modelo XFMR con respecto al modelo BCTRAN, hemos observado que el mejor modelo para llevar a cabo el estudio de sobretensiones es el modelo BCTRAN pues las corrientes y tensiones obtenidas tienen un mayor sentido físico. Por el contrario, el modelo XFMR arroja resultados que carecen de sentido físico. Para llegar a esta conclusión se realizamos varias simulaciones con el modelo XFMR y BCTRAN que se pueden ver en el capítulo 4.

En relación al segundo de los objetivos, se han realizado un conjunto de simulaciones en diferentes circunstancias, que permiten afirmar que el objetivo ha sido alcanzado.

Respecto al tercer objetivo indicar que hemos visto en las simulaciones realizadas las sobretensiones que se pueden producir y por ello el transformador debe de estar bien protegido antes estos esfuerzos que conllevan que la vida útil del transformador se reduzca considerablemente.

En el apartado 6.6 se realiza una comparación del valor de las sobretensiones obtenidas en diferentes casos y se extraen las principales conclusiones del estudio. Recordaremos aquí las principales conclusiones:

- Cuando el valor de la corriente arrancada por el interruptor es nulo no se producen sobretensiones en bornas del transformador.
- Cuando la corriente arrancada es igual al valor de cresta de la corriente de vacío del transformador se pueden alcanzar sobretensiones del orden del 47% de la tensión de red.
- La cuantía de las sobretensiones es diferente en cada una de las fases, ya que en un sistema trifásico equilibrado, en un determinado instante de tiempo la corriente es diferente en cada una de las fases. Así, por ejemplo si se abre el interruptor en el paso por máximo de la corriente en la fase A, en el caso lineal

sin pérdidas se tiene una sobretensión del 47% en la fase cuya corriente era máxima al abrir. La corriente en las otras dos fases es idéntica y las sobretensiones que se tienen también (11% y 14%).

- Si se considera la no linealidad de la corriente de vacío del transformador las sobretensiones se reducen a sólo un 6,9% de la tensión de red en la peor de las fases. Esto es debido a que al saturarse el transformador la corriente capacitiva crea un flujo menor del que cabría esperar si el transformador no estuviera saturado. En las fases en las que la corriente no es máxima no hay sobretensión.

Por lo que se refiere al cuarto objetivo, aparte del esperable mayor amortiguamiento de las ondas de tensión, hemos observado lo siguiente:

- Las pérdidas en cortocircuito apenas tienen influencia en la cuantía de las sobretensiones.
- Las pérdidas en vacío ejercen un gran amortiguamiento de las sobretensiones, de modo que las sobretensiones se reducen a sólo un 5% de la tensión de red en la peor de las fases. En las fases en las que la corriente no es máxima no hay sobretensión.
- Si se consideran simultáneamente la no linealidad de la corriente de vacío y las pérdidas de vacío, la sobretensión en la peor de las fases es de apenas un 1,7%. En las fases en las que la corriente no es máxima no hay sobretensión.

Todo esto quedo explicado en el punto 6.5 de conclusiones que se hizo en el capítulo 6.

Como conclusión de todo lo anterior, decir que hemos alcanzado satisfactoriamente todos los objetivos expuesto en líneas anteriores.

Por último, y aunque no figuraba dentro de los objetivos de este Trabajo Fin de Grado, se analizó de forma somera el efecto del terciario en el transitorio de desconexión. Se han realizado dos simulaciones en las que distinguimos el estado del neutro:

- Puesta del neutro a tierra
- Neutro aislado

Observamos que cuando el neutro está aislado el comportamiento del transformador tras la apertura efectiva del interruptor, es el teórico esperado puesto que al estar el neutro aislado, la primera corriente en extinguirse es la primera que pasa por cero, y a partir de este instante la intensidad de las otras dos fases es la imagen especular la una de la otra puesto que no hay camino de retorno para las corrientes.

Para el caso en que el neutro esta puesto a tierra, el comportamiento del transformador tras la apertura efectiva del primer polo del interruptor es diferente a lo esperado, puesto que lo esperado sería que la forma de onda de las corrientes en las dos

fases que todavía están conectadas a la red fueran idénticas a las que se tenían antes de la apertura efectiva del primer polo.

Sin embargo esto no se produce así, puesto que la primera fase se extingue de acuerdo a lo esperado pero las otras dos fases hacen un comportamiento extraño debido a los flujos homopolares que se haya en el triángulo del devanado terciario.

7.3. Sugerencias para futuros trabajos

El transitorio de desconexión de un transformador en vacío es un transitorio complejo cuyo estudio dista mucho de estar finalizado. Habría que analizar, entre otros, los siguientes fenómenos:

- Cuando el interruptor produce un arranque de corriente la corriente en el transformador se extingue, pero también se extingue la corriente en la línea de alimentación. La corriente no se extingue en tiempo cero, sino que se extingue después de un transitorio de ondas viajeras. El realizar este estudio no es algo inmediato, sino que hay que desarrollar un modelo expreso.
- El estudio de la influencia del terciario en las sobretensiones de desconexión del transformador se sale de este TFG porque la carga crediticia del mismo es limitada y este estudio requiere de bastante tiempo. Este estudio no se puede dar por concluido con lo analizado en este TFG.
- En este trabajo fin de grado se han abordado sólo los bancos de transformación compuestos por unidades monofásicas. El estudio en otros casos (transformadores de tres columnas o transformadores acorazados) merece trabajo aparte.

8. BIBLIOGRAFIA

- Burgos, J. C. Instalaciones eléctricas. Diapositivas de la asignatura. Aula Global Universidad Carlos III.
- Celis-Montero, J. E., Castro-Aranda, F. y Martínez.Velasco, J. A. (2012). Modelo práctico del transformador de distribución trifásico para análisis de transitorios de baja frecuencia: Identificación de parámetros. *Revista chilena de ingeniería*, 20 (3), 293-303.
- Domínguez, R. (2015). Conexión estrella-estrella de banco de transformadores trifásicos. Recuperado el 15 de abril de <http://faradayos.blogspot.com.es>.
- Greenwood, A. (1991). *Electrical Transients in power systems*. United States of America: Wiley
- Haginomori, E., Koshiduka, T., Arai, J. y Ikeda, H. (2016). *Power System Transient Analysis*. United Kingdom: Wiley.
- Martínez, J. A. (2007). *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*. Mc Graw Hill Interamericana.
- Norma UNE-EN 60071-1:2006 “Coordinación de aislamiento”
- Paap, G. C., Alkema, A. A. y van der Sluis, L. (1995). Overvoltages in Power Transformers Caused by No-Load Switching. *IEEE Transactions on power delivery*, 10 (1), 301-307.
- Pokryvailo, A. (14-18 mayo 2007). On Electromagnetic Processes in HV Transformers os Switching-Mode Power Supplies at No-Load Conditions. Power Modulator Symposium. Arlington, VA, USA.
- Popov, M. y van der Sluis, L. (2001). Improved Calculations for No-Load Transformer Switching Surges. *IEEE Transactions on power delivery*, 16 (3), 4001-408.
- Schneider Electric España (2006). *Manual teórico-práctico. Schneider. Instalaciones en Baja Tensión*. España.

9. ANEXO 1: FIGURAS

Figura 1-1 Tipos de sobretensiones	7
Figura 2-1 Circuito equivalente eléctrico del transformador trifásico de tres columnas.....	13
Figura 2-2 Circuito equivalente del transformador XFMR	15
Figura 3-1 Circuito equivalente del transformador.	17
Figura 3-2 Tensión Transitoria de Restablecimiento	17
Figura 3-3 Representación de tensiones y corrientes durante el corte de una pequeña corriente inductiva en el paso por cero	18
Figura 3-4 Representación de tensiones y corriente durante el corte de una pequeña corriente inductiva antes del paso por cero	19
Figura 3-5 Circuito equivalente exacto de un transformador real reducido al primario.....	20
Figura 4-1 Banco de transformadores trifásico.....	22
Figura 4-2 Ajuste de corriente de vacío del transformador	23
Figura 4-3 Corriente de vacío del transformador con el neutro PAT. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C.....	23
Figura 4-4 Corriente de vacío del transformador con el neutro PAT. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C.....	24
Figura 4-5 Circuito dieléctrico de un transformador de dos arrollamientos	25
Figura 4-6 Circuito apertura interruptor XFMR con PAT.....	27
Figura 4-7 Corriente de vacío del transformador XFMR con PAT. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C.....	28
Figura 4-8 Tensión Transitoria de Restablecimiento del transformador XFMR con PAT. Caso lineal. Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.....	28
Figura 4-9 Circuito apertura interruptor XFMR con neutro aislado	29
Figura 4-10 Corriente de vacío del transformador XFMR con Neutro Aislado. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C	29
Figura 4-11 Tensión Transitoria de Restablecimiento del transformador XFMR con el neutro aislado. Caso lineal. Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.....	30
Figura 4-12 Sistema con neutro aislado y diagrama fasorial de dicho circuito.	30
Figura 4-13 Circuito apertura interruptor BCTRAN con PAT.....	31
Figura 4-14 Corriente de vacío del transformador BCTRAN con Neutro Puesto a Tierra. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C	31
Figura 4-15 Tensión Transitoria de Restablecimiento con el neutro aislado. Caso lineal. Curva Roja: Tensión fase A. Curva Verde: Tensión fase B. Curva Azul: Tensión fase C.	32
Figura 4-16 Circuito apertura interruptor BCTRAN con neutro aislado.....	33
Figura 4-17 Corriente de vacío del transformador BCTRAN con Neutro Aislado. Caso lineal. Curva Roja: corriente en la fase A. Verde: corriente en la fase B. Azul: Corriente en la fase C	33
Figura 4-18 Tensión Transitoria de Restablecimiento del transformador BCTRAN con el neutro aislado. Caso lineal. Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.....	34
Figura 5-1 Curva de magnetización del ensayo de Mork y Martínez.....	35

Figura 5-2 Circuito eléctrico del transformador.....	37
Figura 5-3 Impedancias en triangulo y estrella	37
Figura 5-4 Transformación triangulo-estrella simplificada.....	38
Figura 5-5 Transformación triangulo-estrella simplificada.....	39
Figura 5-6 Transformación triangulo-estrella simplificada.....	40
Figura 5-7 Transformación triangulo-estrella simplificada.....	41
Figura 6-1 Circuito simulación con BCTRAN.....	44
Figura 6-2 Ajuste del interruptor.	44
Figura 6-3 Ajustes del transformador	45
Figura 6-4 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)	46
Figura 6-5 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)	47
Figura 6-6 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde).....	48
Figura 6-7 Ajustes del interruptor II.....	50
Figura 6-8 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) y corriente magnetizante (curva verde).	50
Figura 6-9 Ajuste del interruptor III.....	52
Figura 6-10 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) y corriente magnetizante (curva verde).	52
Figura 6-11 Ajuste del transformador.....	53
Figura 6-12 Ajuste del interruptor.	54
Figura 6-13 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) y corriente magnetizante (curva verde).	54
Figura 6-14 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde).....	55
Figura 6-15 Ajuste del interruptor.	56
Figura 6-16 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)	56
Figura 6-17 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde).....	57
Figura 6-18 Ajustes del transformador	58
Figura 6-19 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde)	59
Figura 6-20 Tensión de interruptor (curva roja) & tensión red (curva verde).....	60
Figura 6-21 Circuito usado para la realización del estudio transformador BTRAN e inductancia variable.....	61
Figura 6-22 Ajuste de la impedancia variable	62
Figura 6-23 Ajuste del transformador	62
Figura 6-24 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul), corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura).....	63
Figura 6-25 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde).....	63
Figura 6-26 Ajuste del interruptor	64
Figura 6-27 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura).....	65
Figura 6-28 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde).....	65
Figura 6-29 Ajustes del transformador	67

Figura 6-30 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul) corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura)	68
Figura 6-31 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)	69
Figura 6-32 Ajuste del transformador	70
Figura 6-33 Corrientes en el interruptor (curva roja) por la capacidad parásita (curva azul y corriente magnetizante (curva verde) y corriente por la impedancia variable (curva verde oscura)	71
Figura 6-34 Tensión de red (curva roja) & tensión interruptor (curva verde)	72
Figura 6-35 Intensidades (curvas de la izquierda) y tensiones (curvas de la derecha) en el caso lineal sin pérdidas y con corriente arrancada 0,4 A.	74
Figura 6-36 Ajustes del transformador	77
Figura 6-37 Circuito analizado.....	77
Figura 6-38 Corriente de vacío del transformador con tres arrollamientos con el neutro aislado. Caso lineal. Curva Roja: Tensión en la fase A. Verde: Tensión en la fase B. Azul: Tensión en la fase C.....	78
Figura 6-39 Tensión de red en fase A (Curva roja) & Tensión interruptor fase A (curva verde)	79
Figura 6-40 Circuito analizado.....	80
Figura 6-42 Tensión de red en fase A (Curva roja) & Tensión interruptor fase A (curva verde)	81

10.ANEXO 2: TABLAS

Tabla 1-1 Tensiones soportadas normalizadas	7
Tabla 1-2 Tensiones soportadas recomendadas.....	7
Tabla 1-3 Tensiones soportadas normalizadas	8
Tabla 1-4 Nivel de aislamiento normalizado para la gama I	9
Tabla 1-5 Nivel de aislamiento normalizado para la gama II	10
Tabla 4-1 Parámetros del transformador estudiado.	21
Tabla 4-2 Valores de las capacidades.....	24
Tabla 4-3 Resultado de las corrientes con las capacidades modificadas.....	26
Tabla 5-1 Datos del transformador usado.	36
Tabla 5-2 Capacidades de ensayo.	36
Tabla 6-1 Valores teóricos esperados tras la simulación.	45
Tabla 6-2 Tensiones transitorias máximas con comportamiento lineal y corriente arranca 0A.	49
Tabla 6-3 Tensiones máximas cuando la corriente arrancada es 0,15 A y no se tiene en cuenta el efecto de las pérdidas.	51
Tabla 6-4 Tensiones máximas cuando la corriente arrancada es 0,4 A y no se tiene en cuenta el efecto de las pérdidas.	53
Tabla 6-5 Tensiones máximas con pérdidas de vacío y corriente arranca nula	55
Tabla 6-6 Tensiones máximas con pérdidas de vacío y corriente arranca 0,4 A	57
Tabla 6-7 Tensiones máximas con pérdidas de cortocircuito y corriente arranca 0 A.....	58
Tabla 6-8 Tensiones máximas con pérdidas de cortocircuito y corriente arranca 0.4 A.....	60
Tabla 6-9 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0A	64
Tabla 6-10 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0.15 A	66
Tabla 6-11 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0.4 A	66
Tabla 6-12 Tensiones máximas para el caso en que el transformador es no lineal y corriente arrancada 0.4 A	69
Tabla 6-13 Tensiones máximas para el caso en que el transformador pérdidas de cortocircuito es no lineal y corriente arrancada 0.4 A.....	72
Tabla 6-14 Tensiones máximas para el caso en que el transformador tiene ambas pérdidas, es no lineal y corriente arrancada 0.4 A.....	73
Tabla 6-15 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador BCTAN en el caso lineal sin pérdidas.....	73
Tabla 6-16 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador BCTAN en el caso lineal considerando pérdidas con 0 A de corriente arrancada	74
Tabla 6-17 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador BCTAN en el caso lineal con 0,4 A de corriente arrancada considerando diferentes tipos de pérdidas.	75
Tabla 6-18 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador en el caso no lineal sin pérdidas.....	75
Tabla 6-19 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador en el caso no lineal con 0 A de corriente arrancada y considerando diferentes tipos de pérdidas.....	76

Tabla 6-20 Tensiones máximas en el transitorio de desconexión del transformador en el caso no lineal con 0,4 A de corriente arrancada y considerando diferentes tipos de pérdidas. ...	76
Tabla 6-21 Sobretensiones BCTRAN Yyd neutro aislado.....	79
Tabla 6-22 Sobretensiones BCTRAN Yyd puesto a tierra	81